



5G ILMARAJAPINNAN KAUKO- JA LÄHIKENTTÄMITTAUKSET

Janne Koivuranta

Ohjaaja: Marko E Leinonen
Tuomas Jääskö

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2019

Koivuranta J. (2019) 5G ilmarajapinnan kauko- ja lähikenttämittaukset, Oulun yliopisto, Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 41 s.

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä perehdyttiin ilmarajapinnan yli tehtäviin kauko- ja lähikenttämittauksiin sekä mittaustyyppeihin. Työ painottui 5G-teknologiaan. Työssä käydään läpi aluksi teoriaa 5G taajuusalueista ja antennitekniikoista kuten keilanmuodostuksesta ja moniantennitekniikasta sekä käydään läpi kauko- ja lähikenttämittausten periaatteet sekä myös aktiivi- ja passiivimittaustekniikat. Lopuksi analysoidaan ja vertaillaan Compact Antenna Test Range (CATR) -kammion ja Satimo SG64:llä tehtyjen lähikenttä (NF) pallomittausten suorituskäytäntöä. Mittaukset suoritettiin kolmessa vaiheessa passiivimittauksina: yksittäiset antenniportit, yhdistetyt antenniportit ja yhdistettyjen antenniporttien mittaussantennia kääntämällä. Lopuksi suoritettiin myös toistokoe, jotta voidaan olla varmoja Satimo SG64:n stabiilisuudesta.

Mittaustulokset osoittavat, että CATR:n ja Satimo SG64:n mittaukset korreloivat hyvin keskenään, mutta Satimo SG64:n mittauksista kuitenkin on havaittavissa kokonaisuudessaan korkeampi tehotaso. Kuitenkin Satimo SG64:llä havaittiin olevan enemmän vaihtelua tehomittauksissa taajuuden suhteen kuin CATR kammiolla tehdyissä mittauksissa. CATR kammioiden mittaukset havaittiin myös kestävästi moninkertaisesti verrattuna Satimo SG64:llä tehtyihin mittauksiin. Satimo SG64:llä tehdyn toistokokeen myötä voidaan myös todeta järjestelmän olevan stabiili eikä siis testituloksissa ole suuria eroja.

Avainsanat: mittaustulokset ilmarajapinnan ylitse, keilanmuodostus, kaukokenttämittaus, lähikenttämittaus, CATR

SISÄLLYS

1	.....
TIIVISTELMÄ	.....
2		
SISÄLLYS	.....
3 LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT	.....
4		
1. JOHDANTO	.....
6		
2. 5G taajuusalueet ja antennitekniikka	.....	7
2.1. Radioaalloista	.....
7		
2.2. 5G taajuusalueet	.....	8
2.3. MIMO	.....	11
2.4. mMIMO ja keilanmuodostus	.....
13		
2.4.1 Digitaalinen keilanmuodostus	.....	14
2.4.2 Analoginen keilanmuodostus	.....	14
2.4.3 Hybridi keilanmuodostus	.....
15		
2.5. Polarisaatio	.....
16		
2.6. Kaistanleveys	.....
17		
3. Kauko- ja lähikenttä mittaukset	.....	19
3.1. Lähikenttä mittaukset	.....	19
3.2. Kaukokenttämittaukset	.....	21
3.2.1 Kaukokenttä mittaukset CATR-kammiossa	.....	22
3.3. Aktiivi- ja passiivimittaukset	.....	23

3.3.1 Aktiivimittaukset	23
3.3.2 Passiivimittaukset	24
4. Mittaukset ja niiden analysointi	25
5.1 Yksilölliset antenniporttimittaukset porteille 1 ja 2	26
5.2 Yhdistettyjen antenniporttien mittaukset	32
5.3 Tulosten analysointi ja yhteenveto	39
5. Yhteenveto	40
6. LÄHTEET	41

LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

AUT	Testattava antenni
BER	Bittivirhesuhde
BF	Keilanmuodostus
BLER	Sanomavirhesuhde
CATR	Tiivis antennitestauksetäisyys
DAC	Digitaalinen-analoginen muunnos
DT	Alaskallistus
DUT	Testattava laite
EHF	Erittäin korkea taajuus
EIRP	Ekvivalenttinen isotrooppinen säteilyteho
FDD	taajuusjakoinen duplexi
FF	Kaukokenttä
FFT	Fourier muunnos
FR1	Ensimmäinen taajuusalue
FR2	Toinen taajuusalue
HF	Korkea taajuus
HPBW	Puolen tehon kaistanleveys
IF	Välitaajuus
LF	Matala taajuus
LO	Paikallisoskillaattori
LOS	Näköyhteys
MF	Keskisuuri taajuus
MIMO	moniantennitekniikka
NF	Lähikenttä
NR	New Radio
OTA	Ilmarajapinnan yli
RF	Radioyksikkö

SDL	täydentävä laskeva siirtotie
SER	Symbolivirhesuhde
SHF	Super korkea taajuus
SNR	Signaali-kohinasuhde
STBC	Alamoutin avaruus-aika lohkokoodaus
SUL	täydentävä nouseva siirtotie
TDD	aikajakoinen duplexi
TRP	Kokonaissäteilyteho
TRS	Kokonaissäteilyherkkyys
TRX	Lähetys-vastaanotto
UE	User equipment
UHF	Huippu korkea taajuus
VHF	Todella korkea taajuus
VLF	Todella matala taajuus
mMIMO	massiivinen moniantennitekniikka
A_e	Tehollinen pinta-ala
c	Valonnopeus
D	Antennin halkaisija
E_b	Energia per bitti
f	Taajuus
G	Vahvistus
G_r	Vastaanottimen vahvistus
G_t	Lähetyksen vahvistus
N_0	Kohinan energia taso
P_r	Vastaanotetun signaalin teho
P_t	Signaalin lähetysteho
R	Lähettimen ja vastaanottimen etäisyys
λ	Aallonpituus

1. JOHDANTO

New Radio (NR) eli 5G-teknologian rakentamisessa ja kehittämisessä suurta roolia esittävät ilmarajapinnan yli tehtävät mittaukset eli OTA (over the air) -mittaukset. OTA-mittausten merkitys tuotteen kehitykseen on huomattavasti suurempi kuin edellisillä mobiiliverkoilla esimerkiksi WCDMA:lla (3G) tai LTE:llä (4G). Tämä siksi, että 5G-teknologian FR1 (alle 6 GHz) ja FR2 (24.25 GHz – 52.6 GHz) taajuusalueiden kanssa käytetään ”keilanmuodostus” (beamforming - BF) tekniikkaa näiden taajuuksien heikosta kantamasta johtuen. Puhekielessä käytetty termi ”beamformaus” aiheuttaa omat uudet haasteet UE:n (User equipment = käyttäjä) paikallistamiseen ja seuraamiseen sekä mittausten ja raportoinnin suorittamiseen.

Tässä työssä perehdytään kauko- ja lähikenttämittauksiin. Työssä aluksi perehdytään radioaaltoihin ja erityisesti 5G:n taajuusalueisiin sekä tutustutaan erilaisiin antennitekniikoihin sekä keilanmuodostukseen. Sen jälkeen käydään läpi lähi- ja kaukokenttämittausten periaatteet ja -teoria sekä perehdytään aktiivi- ja passiivimittausmetodeihin.

Työn lopussa vertailemme CATR -kammion ja Satimo SG64:llä tehtyjen lähikenttä (NF) pallomittausten suorituskkyä. Työssä tutkitaan molempien järjestelmien säteilykuvioden korreloivuutta sekä vertaillaan teho-, vaihe- ja EIRP- arvoja. Mittaukset suoritetaan ensin yksittäisillä antenniporteilla, jonka jälkeen yhdistetyillä antenniporteilla. Lopuksi tutkitaan kuinka eri tekniikoiden säteilykuviot korreloivat keskenään, kun radion antenneja käännetään vasemmalla ja oikealle sekä suoritetaan toistokoe, jotta voimme varmistua Satimo SG64:n stabiilisuudesta.

2. 5G TAAJUUSALUEET JA ANTENNITEKNIikka

2.1. Radioaalloista

Radioaallot ovat sähkömagneettista säteilyä, jotka kulkevat tyhjiössä valonnopeudella ($c = 2.99 \cdot 10^8$). Kun tiedetään sähkömagneettisen säteilyn värähtelytaajuus f , voidaan laskea säteilyn aallonpituus

$$\lambda = c/f, \quad (1)$$

missä λ on aallonpituus ja f keskitaajuus.

Sähkömagneettisen säteilyn spektrin 3kHz – 300GHz taajuusalueella värähtelevää säteilyä kutsutaan radioaalloiksi. Tämä taajuusalue on jaettu käyttötarkoituksen perusteella vielä pienempiin taajuusalueisiin alla olevan taulukon mukaisesti.

Taulukko 1.

Very Low Frequency	VLF	3 - 30 kHz	
Low Frequency	LF	30 – 300 kHz	AM radio
Medium Frequency	MF	300 - 3000 kHz	
High Frequency	HF	3 - 30 MHz	Lyhytaalto radio
Very High Frequency	VHF	30 - 300 MHz	FM radio
Ultra High Frequency	UHF	300 - 3000 MHz	Televisio, Mobiililaitteet
Super High Frequency	SHF	3 – 30 GHz	Satelliittilinkit, Langaton kommunikointi, 5G
Extremely High Frequency	EHF	30 - 300 GHz	

Edelliset mobiiliteknologiat (1G, 2G, 3G, 4G) sijoittuvat yllä olevan taulukon UHF alueelle. Tuo taajuuskaista alkaa kuitenkin olemaan täynnä, koska edelliset mobiiliteknologia sukupolvet kattavat sen, minkä vuoksi uuden mobiiliteknologian tuominen kyseiselle taajuusalueelle ei ole mahdollista. Vaihtoehtoina on, joko jonkin sukupolven mobiiliteknologian korvaaminen 5G:llä tai siirtyminen uudelle taajuusalueelle. Varhaisimmilla mobiiliteknologioilla on kuitenkin todella kattava kuuluvuus, pidemmän aallonpituuden ansiosta, jonka vuoksi ne ovat oleellisen tärkeitä harvaan asutuilla alueilla eikä niiden pois jättäminen ole suotavaa. Tästä syystä 5Gteknologia rakennetaan toimivaksi seuraavalle taajuusalueelle, jossa on riittävästi kaistaa vapaana eli SHF-alueelle. Toisin kuin edellisillä mobiiliteknologioilla, 5G teknologiassa halutaan keskittyä enemmän spektrin käytön tehokkuuteen (bitit per hertz per alue) kuin spektrin tehokkuuteen (bitit per hertz). Spektrin tehokkuuden parantamista rajoittaa Shannonin raja, jolloin pelkästään koodauksen ja modulaation avulla suorituskyvyn parantaminen on vaikeaa [2]. Spektrin käytön parantaminen vaatii uusia metodeja. Näitä ovat muun muassa MIMO (multiple input multiple output) ja BF (Beamforming). Shannonin raja on alin

SNR (signaalin suhde kohinaan) arvo, jolloin kanavan kapasiteetti on positiivinen. Shannonin rajaksi on laskettu arvo -1,6 dB, joka saadaan laskettua kaavalla

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{\log_2 e} = -1,6 \text{ dB}, \quad (2)$$

missä $\frac{E_b}{N_0}$ on SNR.

2.2. 5G taajuusalueet

5G mobiiliteknologian taajuusallokaatio on hajautettu kahdeksi taajuusalueeksi 3GPP (3rd Generation Partnership Project) Release 15 standardisoinnin mukaisesti: taajuusalue 1:ksi (FR1) ja taajuusalue 2:ksi (FR2) eli toisin sanoen senttimetriaalloiksi (cmW) ja millimetriaalloiksi (mmW). FR1:n sisältää taajuuskaistat (taulukko 2), jotka ovat alle 6 GHz ja FR2:n sisältää taajuuskaistat (taulukko 3), jotka ovat välillä 24.25 GHz – 52.6 GHz.[6] Suunnitelmissa on myös laajentaa FR1 taajuuteen 7 GHz asti, sekä taajuusalueiden FR1 – FR2 ero tullaan kuroma kiinni. Taulukot 2 ja 3 sijaitsevat kappaleen lopussa.

Jo edellä mainitun kaavan (1) avulla voidaan laskea ja huomata, että mitä korkeampi taajuus sen pienempi aallonpituus. Korkeampi taajuusalue tarjoaakin nopeampaa tiedonsiirtoa ja kapasiteetin kasvua, mutta lyhyemmän aallonpituuden vuoksi signaaliin kantama ja läpäisykyky pienenee. Alle 6 GHz taajuudet (cmW) tarjoaakin käyttäjälleen hyvän kantaman ja kohtuullisen kapasiteetin (verrattuna mmW) ja yli 6 GHz taajuudet (mmW) taas erinomaisen kapasiteetin, mutta huonolla kantamalla (verrattuna cmW). Toisaalta lyhyemmillä aallonpituuksilla useat antennielementit voidaan pakata tiiviimmin, jolloin antennielementtien lukumäärä saadaan suuremmaksi laitteessa. Antennielementtien määrän kasvaessa antennin vahvistus G ja suuntaavuus D kasvaa.

Koska 3dB vastaa kaksinkertaista tehoa, niin vahvistus A

$$A = 2 \triangleq 3\text{dB}, \quad (3)$$

jolloin 6 dB vastaa nelinkertaista tehoa,

$$A = 2 * 2 \triangleq 3\text{dB} + 3\text{dB} \triangleq 6\text{dB}, \quad (4)$$

josta voimme approksimoida vahvistuksen ja dBi suhteesta, että jos antennivahvistuksen G ollessa kolminkertainen suhteessa isotrooppiseen säteilijään, niin

$$G = 3 \triangleq 5\text{dBi}, \quad (5)$$

missä dBi on antennin vahvistus suhteessa vapaassa tilassa olevaan ideaaliseen ympärisäteilevään säteilijään.

Yhden dipoli säteilijän vahvistus $G = 3 = 5\text{dBi}$ ja jos säteilijöitä on 4 kappaletta niin $G = 5\text{ dBi} + 6\text{ dB}$ ja niin edelleen. Systeemin vahvistuksen kasvaessa antennin tehollinen pinta-ala A_e kasvaa Maxwellin teoreeman mukaisesti. [5] Tehollinen pintaala A_e voidaan laskea kaavalla

$$\lambda$$

$$A_e = \frac{4\pi}{\lambda^2} G, \quad (6) \text{ missä } G \text{ on dipoli säteilijöiden yhteenlaskettu vahvistus.}$$

Friisin yhtälöstä nähdään myös, että mitä suurempi vahvistus G sitä suurempi on vastaanotetun signaalin teho P_r

$$\lambda^2$$

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{4\pi R}{\lambda^2} \right)^2, \quad (7)$$

missä P_t on lähetysteho, G_t on lähetyksen vahvistus, G_r on vastaanottimen vahvistus ja R lähettimen ja vastaanottimen etäisyys. Friisin yhtälöä voidaan käyttää vapaassa tilassa olevien antennien tapauksessa. [5]

Taulukko 2. NR FR1 taajuuskaistat [7]

NR taajuuskaistat	Tukiaseman vastaanottava eli Uplink (UL) taajuus $F_{UL_low} - F_{UL_high}$	Tukiaseman lähettävä eli Downlink (DL) taajuus $F_{DL_low} - F_{DL_high}$	Duplex Mode
n1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
n2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
n3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
n5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
n7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
n8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
n12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
n14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
n18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
n20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
n25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
n28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
n30 ³	2305 MHz – 2315 MHz	2350 MHz – 2360 MHz	FDD
n34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
n38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
n39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
n40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
n41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
n48	3550 MHz – 3700 MHz	3550 MHz – 3700 MHz	TDD
n50	1432 MHz – 1517 MHz	1432 MHz – 1517 MHz	TDD
n51	1427 MHz – 1432 MHz	1427 MHz – 1432 MHz	TDD
n65	1920 MHz – 2010 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
n66	1710 MHz – 1780 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
n70	1695 MHz – 1710 MHz	1995 MHz – 2020 MHz	FDD
n71	663 MHz – 698 MHz	617 MHz – 652 MHz	FDD
n74	1427 MHz – 1470 MHz	1475 MHz – 1518 MHz	FDD
n75	N/A	1432 MHz – 1517 MHz	SDL
n76	N/A	1427 MHz – 1432 MHz	SDL
n77	3300 MHz – 4200 MHz	3300 MHz – 4200 MHz	TDD
n78	3300 MHz – 3800 MHz	3300 MHz – 3800 MHz	TDD
n79	4400 MHz – 5000 MHz	4400 MHz – 5000 MHz	TDD
n80	1710 MHz – 1785 MHz	N/A	SUL
n81	880 MHz – 915 MHz	N/A	SUL
n82	832 MHz – 862 MHz	N/A	SUL
n83	703 MHz – 748 MHz	N/A	SUL
n84	1920 MHz – 1980 MHz	N/A	SUL
n86	1710 MHz – 1780 MHz	N/A	SUL
[n90]	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD

Taulukko 3. FR2 taajuuskaistat [8]

Operating Band	Tukiaseman vastaanottava eli Uplink (UL) taajuus	Tukiaseman lähettävä eli Downlink (DL) taajuus	Duplex Mode
	F _{UL_low} – F _{UL_high}	F _{DL_low} – F _{DL_high}	
n257	26500 MHz – 29500 MHz	26500 MHz – 29500 MHz	TDD
n258	24250 MHz – 27500 MHz	24250 MHz – 27500 MHz	TDD
n260	37000 MHz – 40000 MHz	37000 MHz – 40000 MHz	TDD
n261	27500 MHz – 28350 MHz	27500 MHz – 28350 MHz	TDD

Taulukoissa 2 ja 3 ”Duplex Mode” kuvaa systeemin kaksisuuntaisuutta. TDD (Time division duplex) moodilla systeemissä lähetetään ja vastaanotetaan dataa samalla taajuudella, mutta eri aikaan. FDD (Frequency division duplex) moodilla systeemissä taas lähetetään ja vastaanotetaan dataa eri taajuuksilla, mutta samanaikaisesti. SDL (supplementary downlink – täydentävä laskeva siirtotie) ja SUL (supplementary uplink-only – täydentävä nouseva siirtotie) tarkoittavat systeemin kaksisuuntaisuus menetelmää, jossa nimensä mukaisesti painotetaan enemmän toiseen suuntaan kulkevaa liikennettä ja varataan sille enemmän kapasiteettia.

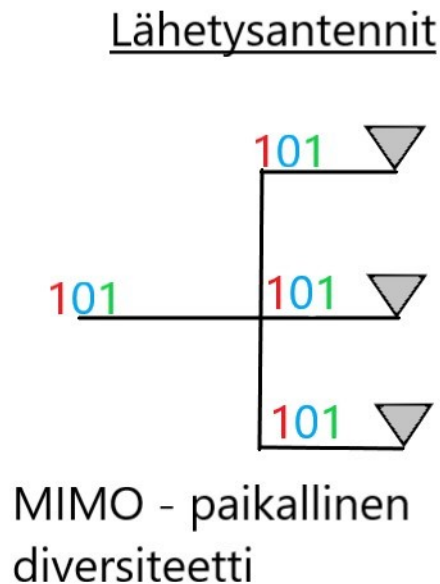
2.3 MIMO

Suuren kapasiteetin vuoksi mmW taajuusalue on tällä hetkellä kiinnostavin tutkimuksen kohde 5G:n kehityksessä. Lyhentynyt kantama LTE mobiiliteknologiaan verrattuna, johtuen antennien koon pienentymisestä ja signaalivaimennuksen lisäyksestä, on kuitenkin suuri haaste kehitystyölle, jonka avuksi tutkijat ovat kehittäneet kaksi metodia: BF ja MIMO.

MIMO tekniikat lisäävät kuuluvuutta ja/tai tiedonsiirto nopeuksia. Tässä tekniikassa käytetään nimensä mukaisesti useaa lähettävää antennia ja useampaa vastaanottavaa antennia, joko siten, että jokaista reittiä pitkin lähetetään samaa informaatiota samalle käyttäjälle tai niin, että jokaista reittiä pitkin lähetetään eri informaatiota samalle käyttäjälle. Näistä tekniikoista ensimmäistä kutsutaan nimellä ”paikallinen diversiteetti” (spatial diversity), jonka avulla pystytään parantamaan systeemin kuuluvuutta. Jälkimmäinen tekniikka on taas ”paikallinen multipleksointi”

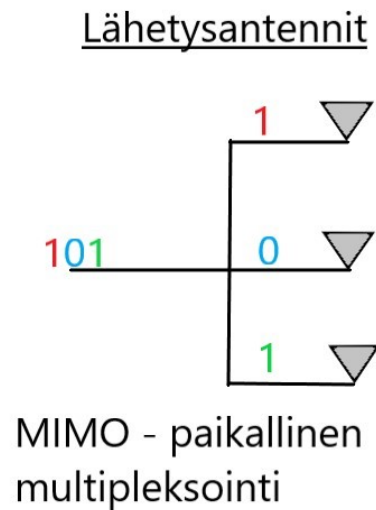
(spatial multiplexing), joka lisää kapasiteettiä. Jos systeemissä on useampi radioyksikkö (RF), kutsutaan MIMO prosessointia koordinoituksi monipiste lähetykseksi (CoMP). [3]

Korkeammilla taajuuksilla on suurempi käytössä oleva kaistanleveys ja suuremman kaistanleveyden ansioista suuremmilla taajuuksilla on suurempi kapasiteetti.[4] Tämän vuoksi mmW taajuuksilla kapasiteetti on luonnostaan jo hyvällä tasolla ja koska mmW taajuuksilla kuuluvuus on haasteena, käytetään yleisesti näillä taajuuksilla spatial diversity MIMO -tekniikkaa. Kuvassa 1 esitetään ko. tekniikan lähettimen periaatteen toiminnasta. Spatial diversity voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä Alamoutin avaruus-aika lohkokoodausta (STBC). STBC:ssä signaalit koodataan keskenään ortogonaalisilla koodeilla ennen kanavaan lähettämistä. Vastaanottimessa signaalit sitten summataan koherentisti yhteen ja lopputuloksena on parantunut SNR.



Kuva 1. MIMO spatial diversity [9]

Spatial multiplexing tekniikassa vastaanottimessa summataan eri kanavia pitkin multipleksoitu data yhdeksi dataksi. Esimerkiksi 4x4 MIMO:lla on tätä tekniikkaa käytettäessä 4-kertainen kapasiteetti SISO:oon (single input single output) verrattuna. [3] Kuvassa 2 esimerkki ko. tekniikan lähettimen periaatteen toteutuksesta.

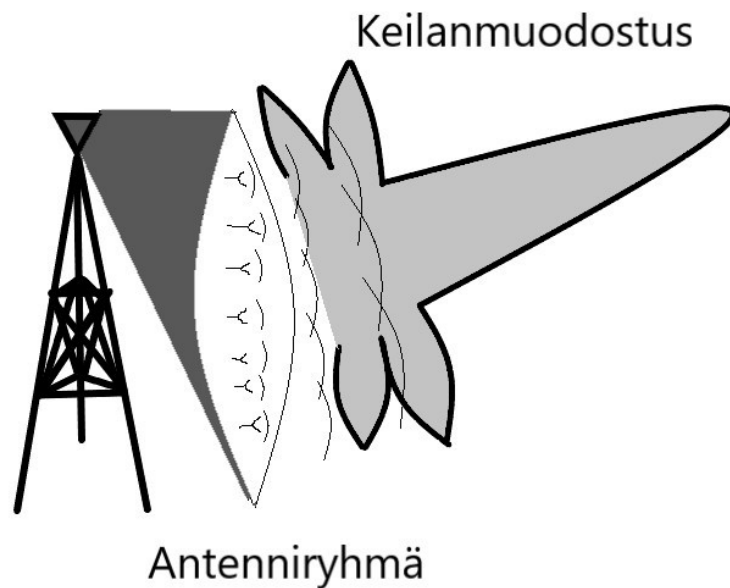


Kuva 2. MIMO spatial multiplexing [9]

2.4 mMIMO ja keilanmuodostus

Massiivinen MIMO eli mMIMO on tietoliikennetekniikassa käytettävä tekniikka, jota käytetään yhdessä keilanmuodostuksen kanssa. Karkea määritelmä mMIMO:lle on systeemi, jossa on useampia antennia kuin käyttäjiä. 5G:ssä mMIMO tarkoittaa yleisesti sitä, että radioyksikössä on 32:sta 64:ään TRX (lähetys-vastaanotto) antenniporttia.

Keilanmuodostusta (Beamforming – BF) ja mMIMOa käytetään puhekielessä yleensä puhuttaessa samasta asiasta. Tosiasiassa BF ja mMIMO ovat kuitenkin eri asia ja mMIMOa käytetään yhdessä BF:än kanssa. Itse BF -tekniikassa radion antennit suunnataan (vaihetta ja amplitudia säätämällä) siten, että eri antennista lähtevät signaalit vahvistavat toisiaan muodostaen keilan, joka osoittaa haluttuun suuntaan. Tällä tekniikalla signaalin kantama ja kapasiteetti kasvaa, mikä on oleellisen tärkeää puhuttaessa 5G teknologian taajuusalueista. Keilanmuodostustekniikoita ovat: digitaalinen-, analoginen- ja hybridi keilanmuodostus. Kuvassa 3 mallinnetaan keilanmuodostuksen periaatetta.

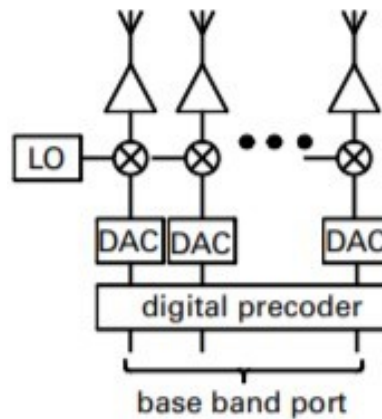


Kuva 3. Keilanmuodostus suuntaamalla antennijoukko vaihetta ja amplitudia säätämällä.[10]

2.4.1 Digitaalinen keilanmuodostus

Digitaalinen keilanmuodostus (Kuva 4) perustuu ajatukseen, että kentällä on useampi käyttäjä. Periaate on se, että samasta antenniryhmästä saadaan muodostettua useampi säde eri käyttäjille. Digitaalisessa keilanmuodostuksessa signaali esi-koodataan kantataajuudella ennen digitaali-analogiamuunninta (DAC) ja RF-lähetystä. Tällä menetelmällä jokaisella antennielementillä on oma kantataajuusportti ja jokaisen antennielementin signaali täytyy muuntaa DAC:lla digitaaliselta kantataajuudelta analogiseksi ennen RF-lähetystä. DAC-lohkot kuluttavat kuitenkin paljon tehoa, jolloin systeemi, jossa on useampi sata antennielementti, joutuu käyttämään paljon energiaa. Tästä syystä, erityisesti FR2-taajuusalueille suunniteltujen radioiden kanssa, joissa on mahdollisuus useammalla antennielementille, analoginen tai hybridi keilanmuodostus on suositeltavampi vaihtoehto. Digitaalinen keilanmuodostus lisää systeemin kapasiteettia, koska systeemin rakenteen vuoksi jokaiselta antennilta

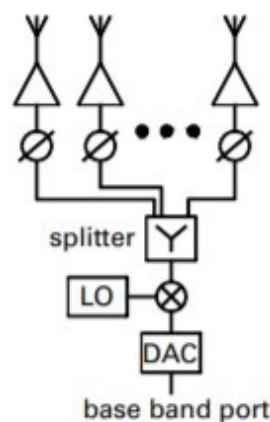
saadaan lähetettyä eri dataa vastaanottajalle. Toisin sanoen tällä tekniikalla voidaan toteuttaa kuvan 2 mukainen spatial multiplexing -tekniikka. [10]



Kuva 4. Digitaalinen keilanmuodostus [10]

2.4.2 Analoginen keilanmuodostus

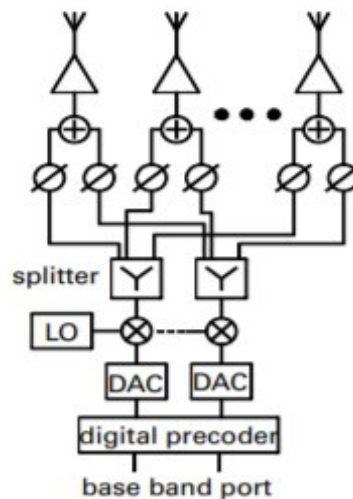
Analogisessa keilanmuodostuksessa (Kuva 5), päinvastoin kuin digitaalisessa, saadaan yhdestä antenniryhmästä yksi säde muodostettua ja kantataajuusportteja ja DAC-lohkoja löytyy ainoastaan yksi. DAC-lohkon jälkeen sama signaali jaetaan jokaiselle antennielementille. Itse keilanmuodostus suoritetaan vaiheensiirtimien ja vaihtoehtoisesti myös yksilöllisten vahvistimien avulla.[10] Koska analogisessa keilanmuodostuksessa muodostetaan vain yksi säde, käyttäjällä voi olla vaikeuksia löytää solu. Ratkaisuksi tähän ollaan kehitetty ”sädelakaisu” (beam sweeping), jossa vaiheensiirtimien avulla liikutetaan sädettä ennalta määritetyllä sektorilla edestakaisin. [11]



Kuva 5. Analoginen keilanmuodostus [10]

2.4.3 Hybridikeilanmuodostus

Hybridikeilanmuodostuksessa (Kuva 6) yhdistetään digitaalinen ja analoginen keilanmuodostus. Hybridikeilanmuodostus on toteutettu siten, että se aikaan saa kompromissin systeemin kompleksiiisyyden ja joustavuuden välillä saaden hyvät puolet molemmista tekniikoista. Käytännössä hybriditekniikassa on useampi kantataajuusportti, entä analogisessa, mutta vähemmän entä digitaalisessa ja systeemissä käytetään sekä vaiheensiirtimiä, kuten analogisessa keilanmuodostuksessa, että erilaisia painotuksia eri antennielementille kuten digitaalisessa keilanmuodostuksessa.[10]



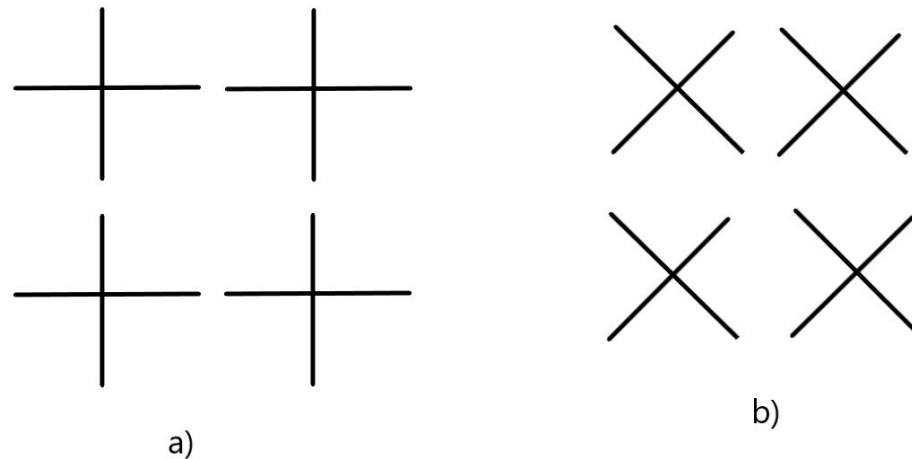
Kuva 6. Hybridikeilanmuodostus [10]

2.5 Polarisaatio

Kun puhutaan polarisaatiosta antennitekniikan yhteydessä, se kuvaa sähkömagneettista aaltoa, jota antenni säteilee tai vastaanottaa tiettyyn suuntaan tai tietystä suunnasta. Polarisaatiota kuvataan antennin akselisuhteen, pyörimisnopeuden ja kallistuskulman avulla. Säteilevän energian polarisaatio vaihtelee suhteessa antennin keskipisteeseen. Se voi myös olla eri suuruinen säteilykuvion eri osissa. Antennin polarisaatio määritetään sen sähkökentällä. Tietoa polarisaatiosta voidaan saada tutkimalla antennin sähkökentän etenemiskuviota. Näiden tietojen perusteella polarisaatio lajitellaan joko lineaariseksi, ympyrän muotoiseksi tai elliptiseksi polarisaatioksi.

Polarisaatio on lineaarinen, jos sähkökentän vektori etenee lineaarisesti haluttuun suuntaan ajan funktiona. Lineaarinen polarisaatio voi olla joko horisontaali- tai vertikaalipolarisaatiota, riippuen eteneekö vektori horisontaalisessa vai vertikaalisessa tasossa. Kun polarisaatio on ympyrän muotoinen, sähkökentän vektori etenee ympyrän muotoisella radalla etenemissuuntaansa ja polarisaatio on elliptinen kun se etenee

elliptisen muotoisella radalla. Ympyrän sekä elliptisen muotoinen polarisaatio voi olla polarisoitunut joko vasen- tai oikeakätisesti. Mikäli ympyrän muotoisesti tai elliptisesti polarisoitunut sähkökentän vektori kiertää etenemissuunnan akselia myötä päivään, se on oikeakätisesti polarisoitunut ja kun vektori kiertää vasta päivään, on se vasen kätisesti polarisoitunut. Kuvassa 7 ilmaistu lineaarisesti polarisoidun 2x2 antenniryhmän orientoituminen a) horisontaalisti /vertikaalisti sekä b) ± 45 asteella.[12]

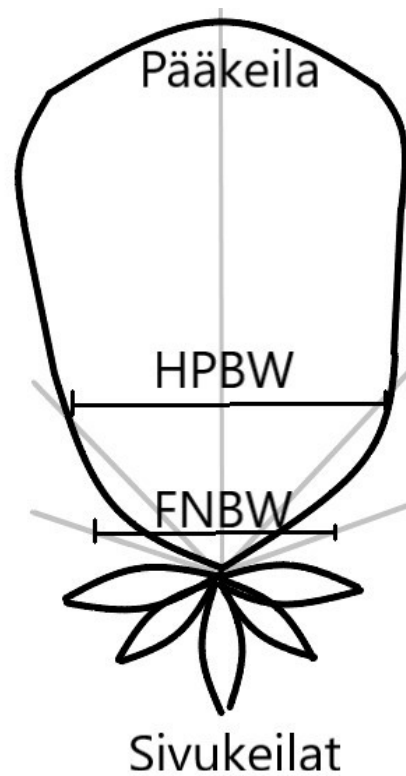


Kuva 7. Lineaarisesti polarisoidun antenniryhmän orientoituminen
a)horisontaalisti/vertikaalisti b) ± 45 asteella. [12]

Kuvan 7 a) kohdan kaltaisesti orientoituneita antennoja kutsutaan kaksoispolarisoituneiksi antenniksi ja b) kohdan kaltaisesti orientoituneita antennoja kaksoiskallistuneiksi antenniksi. Jälkimmäisenä mainitun kaltaisia antennoja käytetään tavallisesti FR1 taajuusalueella. Tämä siksi, että molemmat polarisaatiot siroaa lähes identtisesti matalilla taajuuksilla ja siten molemmilla polarisaatiolla on lähes identtinen suorituskyky. Kaksoispolarisoituneet antennit taas kokevat hyvinkin erilaiset siroonnat eri polarisaatioilla matalilla taajuuksilla, jonka vuoksi tällaisia antenniryhmiä käytetäänkin korkeammilla taajuuksilla, joilla LOS (line of sight – näköyhteys) komponentti on dominoiva ja siroannon aiheuttama vaimennus on pieni. Matalilla taajuuksilla kaksoispolarisaatioantenneilla vertikaalipolarisaatio on vahvempi kuin horisontaalipolarisaatio, joka kokee suurempaa vaimenemista etenemisen ja siroannon vuoksi. [12]

2.6 Kaistanleveys

Kaistanleveys on antennimittausten yksi tärkeimmistä parametreista, joista yleisimpiä on puolen tehon keilanleveys (HPBW) ja ensimmäisen nollan kaistanleveys (FNBW). Nämä parametrit antavat tietoa pääkeilan kulmaerotuksista. HPBW ja FNBW esitetty kuvassa 8.



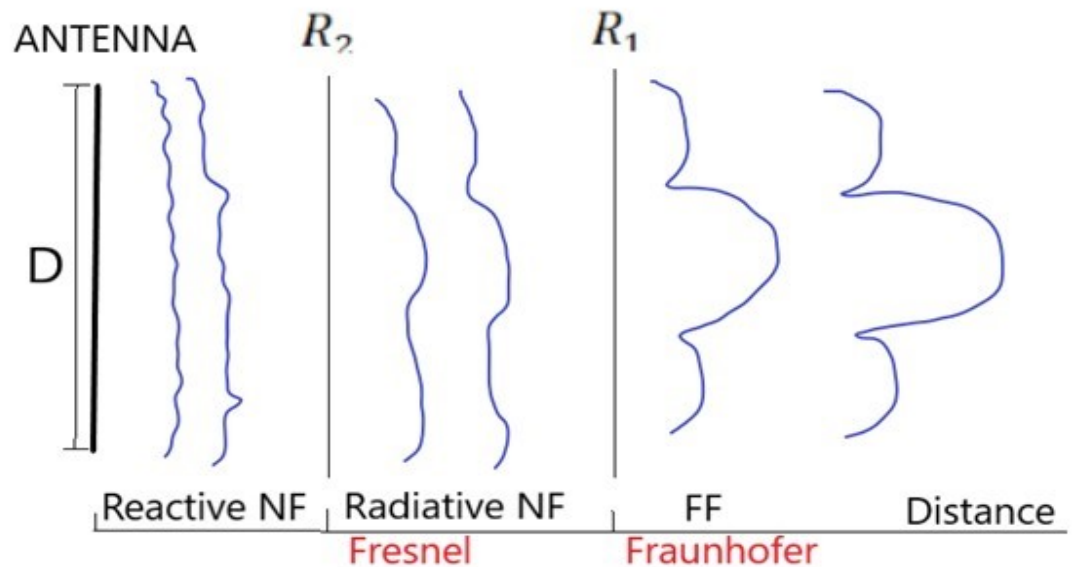
Kuva 8. HPBW ja FNBW mittausten periaatteet.[13]

HPBW mittaa pääkeilan puolitehoisten pisteiden, eli -3dB pisteiden, välistä kulmaa suhteessa pääkeilan tehollisen säteilytehon huippuun. FNBW mittaa taas pääkeilan ensimmäisten nollien välistä kulmaa. [13] Tässä työssä tullaan myöhemmin mittauksissa käyttämään HPBW mittauksia.

3. KAUKO- JA LÄHIKENTTÄ MITTAUKSET

Mittauslaitteen etäisyys lähettävästä antennista, määrittää onko mittaus lähikentässä (NF) vai kaukokentässä (FF) tapahtuvaa mittausta, kuten kuvassa 9 ollaan mallinnettu. Kuitenkin, jokaisella antennityypillä on olemassa sekä NF että FF. Systeemin hinta, koko ja kompleksiivisyys määrittävät kumpaa mittausmenetelmää käytetään. Karkeana nyrkkisääntönä voidaan pitää, että FF mittaukset tapahtuvat FR1 taajuusalueilla, missä vaaditaan yksinkertaiset kuvioleikkausmittaukset ja NF mittaukset tapahtuvat FR2 taajuusalueilla, missä vaaditaan täydelliset kuvio- ja polarisaatiomittaukset.

On olemassa kahta erilaista mittaustyyppiä sekä NF:lle että FF:lle ja niitä ovat aktiivinen ja passiivinen mittaus.[14]



Kuva 9. Reaktiivinen NF, säteilevä NF – Fresnel ja kaukokenttä - Fraunhofer esitetty etäisyyden funktiona. Etäisyys vaaka-akselilla. [15]

3.1 Lähikenttä mittaukset

Kuten kuvasta 9 on nähtävissä, NF koostuu kahdesta osa-alueesta: reaktiivinen ja säteilevä NF. Näistä jälkimmäistä kutsutaan myös Fresnelin kentäksi. NF ja FF välinen raja voidaan laskea antennin halkaisijan D ja aallonpituuden λ avulla

$$R_1 < \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (8)$$

missä R on lähettimen etäisyys DUT:sta. Jos käytössä on sähköisesti suuri antenni ja

etäisyys R on pienempi kuin $\frac{\lambda}{2}$, niin voidaan approksimoida, että ollaan NF

mittausalueella ja jos päinvastoin niin ollaan FF mittausalueella. Samalla periaatteella voidaan määrittää reaktiivisen- ja Fresnelin välinen raja

$$R < \frac{\lambda}{2} \pi, \quad (9)$$

missä R on lähettimen etäisyys DUT:sta ja λ lähetyksen aallonpituus.

Pääasiallinen ero reaktiivisen ja Fresnelin kentän välillä on, että reaktiivisessa kentässä signaalin energia putoaa nopeasti etäisyyden suhteen, kun taas säteilevässä kentässä energian keskimääräinen tiheys pysyy suurin piirtein vakiona etäisyyden kasvaessa. Reaktiivisessa kentässä, nimensä mukaisesti, reaktiivinen kenttä on vallitseva, mikä käytännössä tarkoittaa, että tässä kentässä ei säteilyä tapahdu. [14]

Fresnelin kenttä on reaktiivisen ja FF:n välillä ja, nimensä mukaisesti, säteilevä kenttä on vallitseva. Fresnelin kentässä kulmakentän jakauma riippuu etäisyydestä antenniin. Jos antennin maksimaalinen kokonaismitta on hyvin pieni aallonpituuteen niin tätä kenttää ei välttämättä ole. [16]

Yleisesti NF mittaukset suoritetaan kuitenkin säteilevällä alueella. NF alueella mitattaessa anturin ja testattavan laitteen (DUT) välinen etäisyys täytyy suunnitella huolella. Jos etäisyys on liian suuri, kelvollista kuviota on vaikeampaa saada kiinni ja jos etäisyys on liian pieni niin moniheijastusvirheet kasvavat. Kuitenkin anturin ja DUT:n etäisyys täytyy olla 3λ ja 5λ välillä, jotta staattiset moodit eivät vaikuta mitattuihin tuloksiin. [17]

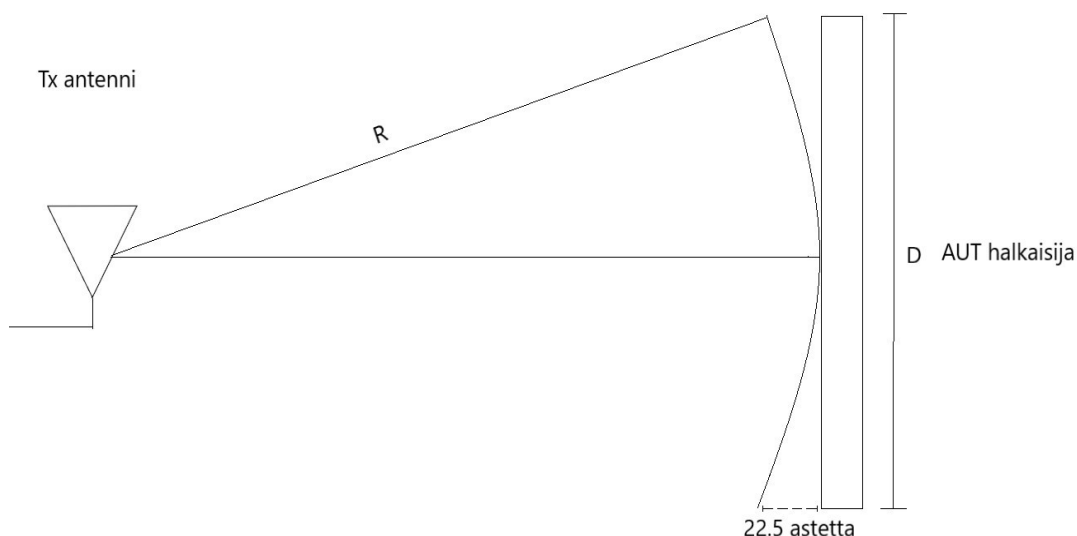
NF mittaukset ovat fyysisesti ja matemaattisesti monimutkaisempia kuin FF mittaukset. Kuitenkin lyhyempien etäisyyksien vuoksi NF mittaukset ovat usein edullisempia ja mittauksia voidaan tehdä useampia ilmasto- ja elektromagneettisesti kontrolloidussa mittauslaboratoriossa. Tämä lisää systeemin tarkkuutta ja suoritustehoa sekä tuottaa tietoa antennidiagnostiikasta. [14]

NF mittausten tuloksista voidaan saada FF muunnos käyttämällä Fourier muunnosta eli FFT:tä. Tämä on todella käytännöllinen menetelmä, koska NF mittaukset ovat yleisesti helpommin toteutettavissa, entä FF mittaukset. NF – FF muunnokseen tarvitaan tarkat tiedot signaalin luonteesta: amplitudi, vaihe, modulaatio. [17]

NF mittausten tarkoituksena on saada tietoa säteilykentän kuviosta, vahvistuksesta ja polarisaatiosta. Yleisimpiä NF mittaustekniikoita ovat tasomainen, lieriömäinen ja pallomainen mittausta. Tasomittauksessa antenni on staattinen ja anturia liikutellaan antennin edessä X- ja Y-suunnassa. Lieriömittauksessa antennia pyöritetään vaakatasossa akselinsa ympäri. Anturi pyörii antennin kanssa samaan tahtiin, mutta samalla liikkuen Y -suunnassa. Toinen mahdollinen menetelmä on, että antenni on paikoillaan ja probe liikkuu sylinterimäisesti antennin ympäri. Pallomainen voidaan suorittaa esimerkiksi niin, että anturi asetetaan staattiseksi antennin läheisyyteen ja antennin pyörii tupla-akselinsa ympäri.

3.2 Kaukokenttämittaukset

Kaukokenttä mittauksissa lähettävän antennin ja vastaanottavan etäisyys R täytyy olla tarpeeksi suuri, jotta vastaanottavan antennin muodostava vaiherintama on lähes tasomainen. Vaihevirhe alkuperäisestä vaiheesta saa olla maksimissaan 22,5 astetta antennin sekä mittausantennin fyysisen mitan laidoilla. Kuvassa 10 on mallinnettu kaukokenttämittauksen ääripäätä, jossa vaihevirhe on juuri 22,5 astetta.



Kuva 10. Fraunhoferin etäisyys [14]

FF mittaukset voidaan suorittaa joko sisätiloissa tai ulkotiloissa. Mittausten valmistelemisen tärkein elementti on testattavan antennin toimintaympäristön simuloiminen. Toimintaympäristön simuloinnissa on otettava huomioon useita tekijöitä, joita ovat mm. sää, budjetti, tietoturva, testattava taajuus, kuvion ja vahvistuksen mittausten vaadittu tarkkuus. Testattava antenni (AUT) asennetaan joko yksittäis- tai moniakseliseen antennipaikoittimeen. Mittauksissa AUT:tä pyöritetään akselinsa ympäri saaden näin tallennettua amplitudin ja vaiheenarvot kulman funktiona halutun mittauskuvion tuottamiseksi.

Kun suoritetaan mittaukset sisätiloissa, on otettava huomioon seinistä heijastuvat säteet, jotka voivat vaimentamattomana häiritä pääsignaalia. Tästä syystä sisätiloissa suoritettavat mittaukset tehdään häiriövaimennetussa kammioissa, joiden seinät vuorataan radiosignaaleja vaimentavilla materiaaleilla. Vaikkakin mittaukset suoritetaan tämän kaltaisissa kammioissa, voi vääristymät silti vaikuttaa mittausten tuloksiin.

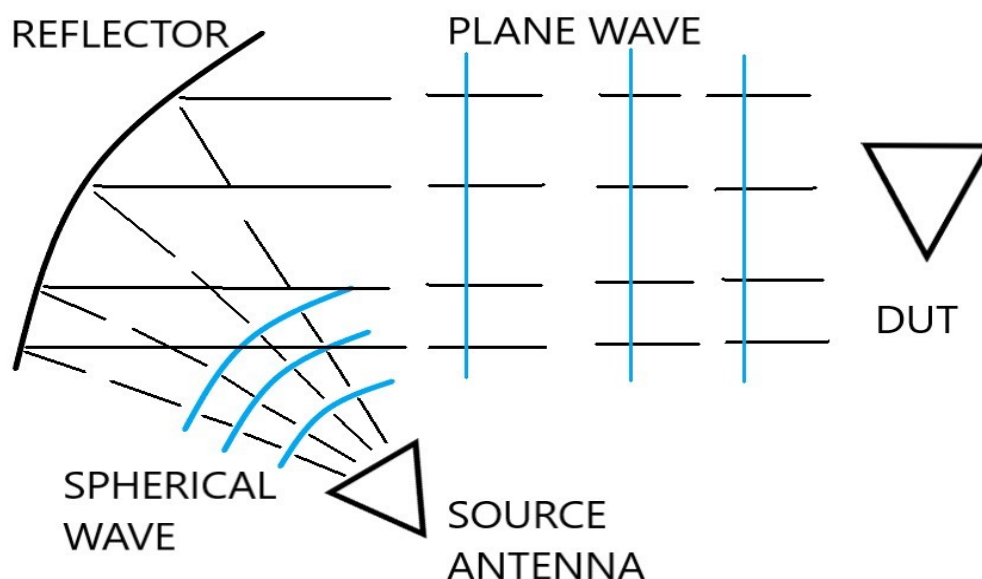
Ulkotiloissa suoritettavia testivariaatioita on useita ja näitä on mm. vino, vapaa tila ja heijastus. Käytettiin sitten mitä variaatiota tahansa, on testit suunniteltava siten, että signaalin amplitudi tai vaihe eivät vääristy ja näin aiheuta vääristyneitä mittaustuloksia.

Myöskin erillistä referenssikanavaa käytetään referenssisignaalin lähetykseen ja vastaanottoon. Referenssisignaaliin verrattaessa testattavaa signaalia on helppo nähdä

kanavan aiheuttamat tehon ja vaiheen vaihtelut. Referenssisignaali voidaan lähettää toisesta antennista ilmarajapinnan yli tai vaihtoehtoisesti kaapelia pitkin vastaanottimeen. [14]

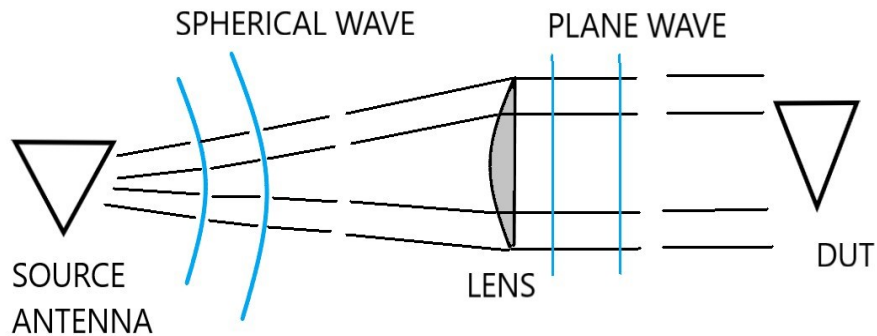
3.2.1 Kaukokenttä mittaukset CATR-kammiossa

Kaukokenttä mittauksia voidaan suorittaa kontrolloidussa sisätilassa CATR-kammiossa. CATR-kammion tekniikan avulla pystytään mallintamaan suuriakin etäisyyksiä, vaikka itse kammion fyysinen etäisyys ei ole niin suuri. Toisin sanottuna sillä kyetään luomaan lähes tasomainen vaiherintama (vaihevirhe $< 22,5$ astetta) vaikkakin kammion pituus (10 – 20 metriä) ei täytä kaukokenttä mittausten eli kaavan (10) määritelmää. Tämä tehdään mahdolliseksi heijastimen, linssin, hologrammin ja/tai antenniryhmän avulla. Esimerkiksi CATR-kammio heijastimen avulla toimii siten, että lähdeantenni lähettämä palloaalto osoitetaan paraboloidiheijastimeen. Heijastin toimii muuntimena, joka muuntaa palloaaltorintaman tasoaaltorintamaksi joka edelleen osoitetaan DUT:lle. Tällaisen kammion periaate on visualisoitu kuvassa 11. Paraboloidiheijastimen vaatimuksia on, että tehollisarvon vaihtelu täytyy olla vähemmän, että $\lambda/100$. Heijastimen reunat täytyy myös olla sahamaisia, jotta eitoivotut reunojen sironnat saadaan eliminoidua. [15]



Kuva 11. CATR perustuen heijastukseen. [15]

Myöskin dielektriset linssit ovat yleisiä CATR-kammioiden toteutuksissa. Periaate on sama kuin heijastimen kanssa, mutta sähköinen palloaaltorintama kulkee dielektrisen linssin läpi, joka muuntaa aallon tasomaiseksi, josta aalto jatkaa matkaansa DUT:lle. Linssin tulee olla hyvin paksua ja homogeenistä sekä sen täytyy olla muotoiltu siten, että reunojen diffraktio on minimaalista. Myös metallisia hammaslevyjä käytetään reunojen diffraktion vähentämiseen. Kuvassa 12 esitetty dielektriseen linssiin perustuva CATR-tekniikka. [15]



Kuva 12. Linssiin perustuva CATR. [15]

3.3 Aktiivi- ja passiivimittaukset

Aktiivimittauksissa DUT luo testattavan signaalin ja on, nimensä mukaisesti, jatkuvasti aktiivinen. Radiokanavaemulaattoria käytetään usein aktiivisissa MIMO ja BF mittauksissa. Radiokanavaemulaattorit ovat hyödyllisiä testattaessa laboratoriossa sillä niiden avulla voidaan simuloida signaalin häipymistä todellisessa ympäristössä esimerkiksi kaupunkialueella tai metsässä sekä liikkeen aiheuttamaa häipymistä. Radiokanavaemulaattori mahdollistaa helpomman siirtymisen laboratorio olosuhteista kenttätesteihin, koska emulaattorin kanssa tehdyt laboratoriotestitulokset estimoivat kenttätestien tuloksia.[12]

3.3.1 Aktiivimittaukset

Aktiivimittauksia voidaan suorittaa ilmarajapinnan yli tai kaapelin kautta. Kaapelin kautta testattaessa ei oteta huomioon antennielementtien aiheuttamia häviöitä vaan ne oletetaan ideaalisiksi. Kaapelin kautta mitattaessa ollaan kiinnostettu itse DUT:n suorituskyvystä eikä niinkään antennielementtien suorituskyvystä vaikkakin antennielementtien huono suorituskky näkyy itse DUT:n mittaustuloksissa,

Ilmarajapinnan yli testattaessa ei ole mitään fyysistä linkkiä lähettimen ja vastaanottimen. Mittauksissa ollaan kiinnostettu sekä lähetys- että vastaanottosuorituskyvyistä. Lähettimen suorituskkyä kuvaa kokonaissäteilytehoa (total radiated power – TRP). TRP saadaan laskettua kaavalla

$$TRP = \frac{EIRP}{D}, \quad (10)$$

missä D on suuntaavuus ja EIRP (equivalent isotropically radiated power) tarkoittaa ekvivalenttisesti isotrooppisesti säteilytehoa. EIRP:llä mitataan keilan tehon määrää

halutussa suunnassa. EIRP näytteitä otetaan tietyllä resoluutiolla joka puolelta piiriä. Jotta voidaan varmistaa kunnollinen säteilykuvio FF:lle, näytteitä tulisi ottaa 15 asteen välein niin atsimuutti kuin korkeus suunnassa eli yhteensä 528 näytettä. [12] TRP:n laskeminen useammasta EIRP näytteestä suoritetaan integroimalla horisontaalisen ja vertikaalisen koordinaattien yli eli suorittamalla pallo – tasopinta geometriamuunnos kaavalla

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \text{TRPEIRP}(\theta, \varphi) \sin\theta \, d\theta d\varphi, \quad (11)$$

missä φ on signaalin horisontaalinen kulma ja θ signaalin vertikaalinen kulma.

Digitaalisen systeemin vastaanottimen suorituskvyn mittausten kriteereinä käytetään yleensä erilaisia virhesuhteita sekä vastaanotettua dataa suhteessa lähetettyyn dataan eli suoritustehoa. Mitattuja virhesuhteita voivat olla mm. bittivirhesuhde (BER), symbolivirhesuhde (SER) ja sanomavirhesuhde (BLER). Jo pelkästään virhesuhteilla voidaan päätellä paljonkin vastaanottimen suorituskvyyistä, mutta silti on hyödyllistä mitata vielä suoritusteho, koska näin saadaan kokonaisvaltaisempi kuva käyttäjän ja tukiaseman yhteyden suorituskvyyistä. Vastaanoton mittauksissa voidaan mitata myös kokonaissäteilyherkkyyttä (total radiated sensitivity – TRS) tai ekvivalenttisesti isotrooppisesti säteilyherkkyyttä (equivalent isotropically radiated sensitivity – EIRS). Kuten lähetyksen aktiivimittauksissa, myös vastaanottimen aktiivimittauksissa suositellaan ottamaan näytteitä 15 asteen välein sekä atsimuutti että korkeus suunnassa, mutta vastaanottimen mittauksissa on mahdollista myös tehdä mittauksia 30 asteen välein. Isommalla välillä tehdyt mittaukset karsii tarkkuudesta, mutta mittausaika pienenee.

TRP eikä TRS mittauksissa oteta huomioon etenemiskanavan aiheuttamia vaikutuksia. [12]

3.3.2 Passiivimittaukset

Passiivimittauksia käytetään pääasiassa mittaamaan itse säteilevän antennin suorituskvyyä ja sen luomaa säteilykuviota ja pyritään minimoimaan laitteen, joka generoi signaalin, vaikutusta mittauksiin. Tämä voidaan suorittaa mm. syöttämällä signaalia suoraan signaaligeneraattorilla säteilevään antenniin.

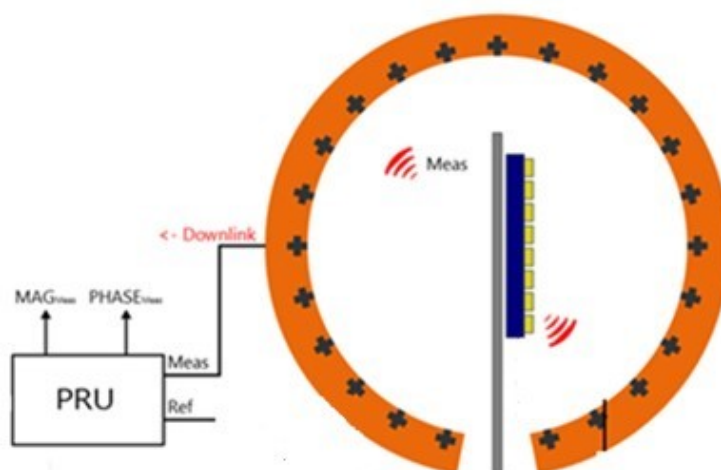
Passiivimittauksia voidaan käyttää esimerkiksi mittaamaan antennin säteilykuvion säätöominaisuuksia, jotta ne voidaan sovittaa aktiiviseen BF käyttöön. Säätöominaisuuksia voidaan tarkastella esimerkiksi tutkimalla sivukeilavaimennus tasoja.

Pääasiallisena erona aktiivi- ja passiivimittaustekniikan välillä voidaan ajatella olevan, että passiivissa mittauksissa testataan komponenttitasolla, kun taas aktiivisissa mittauksissa on kiinnostuttu koko systeemistä. [12]

4. MITTAUKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Mittauksissa vertailtiin heijastinpeiliin perustuvan FF CATR-kammion sekä NF pallomittausten suorituskykyä OTA:na. Mittaukset suoritettiin passiivimittauksina sekä aktiivimittauksina. Vertailuparametreinä käytettiin näiden kahden mittaustekniikan välistä selitysasetta R^2 , tehotasojen, vaiheiden sekä EIRP mittausten eroavaisuuksia. Mittauksissa käytettiin kahdeksan portista 5G radiota, joka liitettiin kahdeksaan antennielementtiin koaksaalikaapeleilla. Antenniportit p1, p2, p3, p7 ovat +45 asteen polarisaatiolla ja antenniportit p4, p5, p6 ja p8 -45 asteen polarisaatiolla. CATR-kammion konfiguraatio on esitetty kappaleessa 3.2.1 sekä kuvassa 9. NF pallomittaukset suoritetaan SATIMO SG64 systeemillä, jolla tehdään NF mittauksia siten, että kaksoispolarisaatioantureita skannataan jatkuvasti samalla kun antennia käännetään 180 astetta.

NF mittaukset täytyy muuntaa FF tuloksiksi, mikä onnistuu FFT-muunnoksella. Vaiheinformaatio tallennetaan SG64 NF-systeemeissä käyttämällä vaihetallennusyksikköä (PRU), mutta tätä varten tarvitaan myös referenssisignaali radiolta kaapeloituna PRU:hun. Kuvassa 13 esitetty mittauskonfiguraatiota.



Kuva 13. Satimo SG64 testikonfiguraation periaate

Mittaukset suoritettiin kolmessa vaiheessa eri alaskallistuksen (DT) arvoilla. DT:n yksi arvo vastaa yhtä astetta. Huomioi mittaustuloksia tutkiessasi, että taajuuskuvaajien taajuudet eivät ole jatkuvia vaan niissä tutkitaan kahta taajuuskaistaa.

1. Antenniportit p1 ja p2 mitattu yksilöllisesti 7DT sekä p1-p2-p3-p7 yhdistetty mitta 2DT (Max. 3D vahvistus, Horisontaali- ja vertikaalikuviot)
2. Keilankääntö oikealle -14 astetta ja vasemmalle +14 astetta 2DT

3. Toistokoe toiselle polarisaatiolle 14 asteen keilankäännöllä vasemmalle 2DT

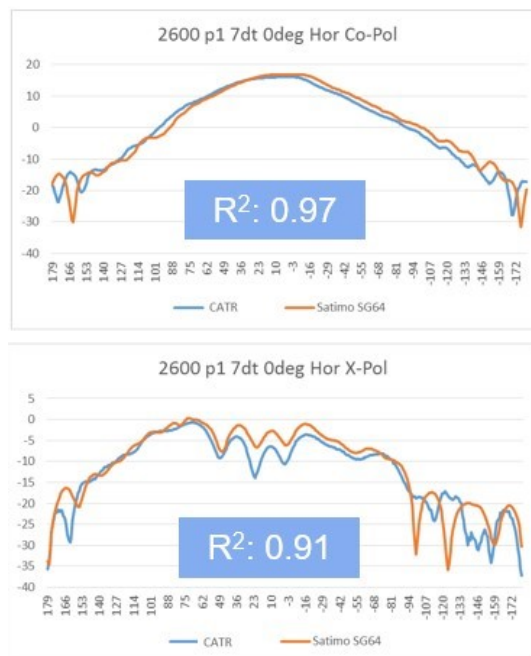
5.1 Yksilölliset antenniporttimittaukset porteille 1 ja 2

Kuvissa 12 ja 13 on piirretty CATR:n (sininen) sekä Satimo SG64:n (oranssi) horisontaalileikkauksella saatu säteilykuvio antenniporteilta p1 ja p2. Kuten selitysaste R^2 kertoo, molempien mittaustekniikoiden säteilykuviot muistuttavat hyvin paljon toisiaan. Alla olevassa taulukossa 4 avattu R^2 :sen numeerisia arvoja.

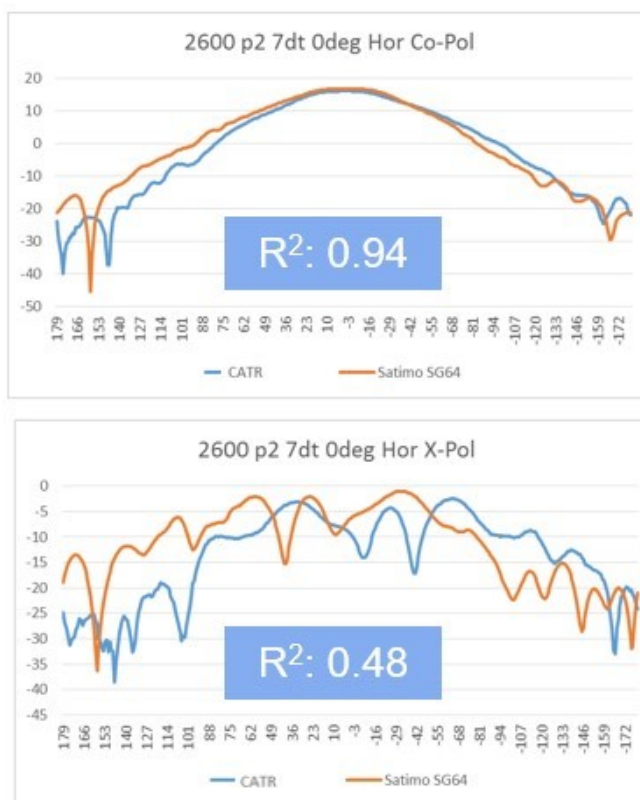
Taulukko 4: Selitysaste R^2 [18]

Korreloivuus	$|R|$	R^2
Vahva	>0.8	>0.64
Kohtalainen	$0.5 < |R| \leq 0.8$	$0.25 < R^2 \leq 0.64$
Heikko	≤ 0.5	≤ 0.25

Pääpolarisaatio (Co-Pol) mittaa mittauksen leikkauksen mukaista säteilyä eli kuvien 14 ja 15 tapauksessa antennin horisontaalipolarisaation säteilykuviota. Ristipolarisaatio (X-Pol) mittauksen leikkauksen ortogonaalista säteilyä eli jos pääpolarisaatio on +45 niin ristipolarisaatio mittaa -45 polarisaatiota. Ainoastaan p2:en ristipolarisaatioiden korrelointi on heikompaa.

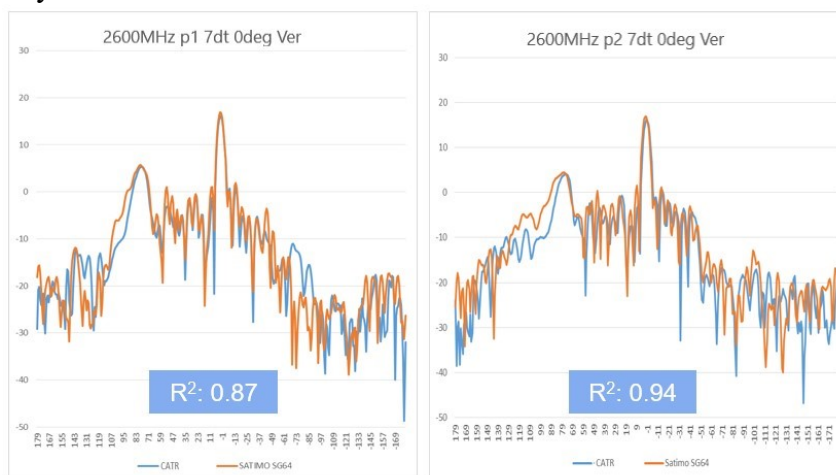


Kuva 14. CATR (sininen) ja SG64 (oranssi) säteilykuvion vertailu horisontaalileikkauksella p1:lle.



Kuva 15. CATR (sininen) ja SG64 (oranssi) säteilykuvion vertailu horisontaalileikkauksella p2:lle.

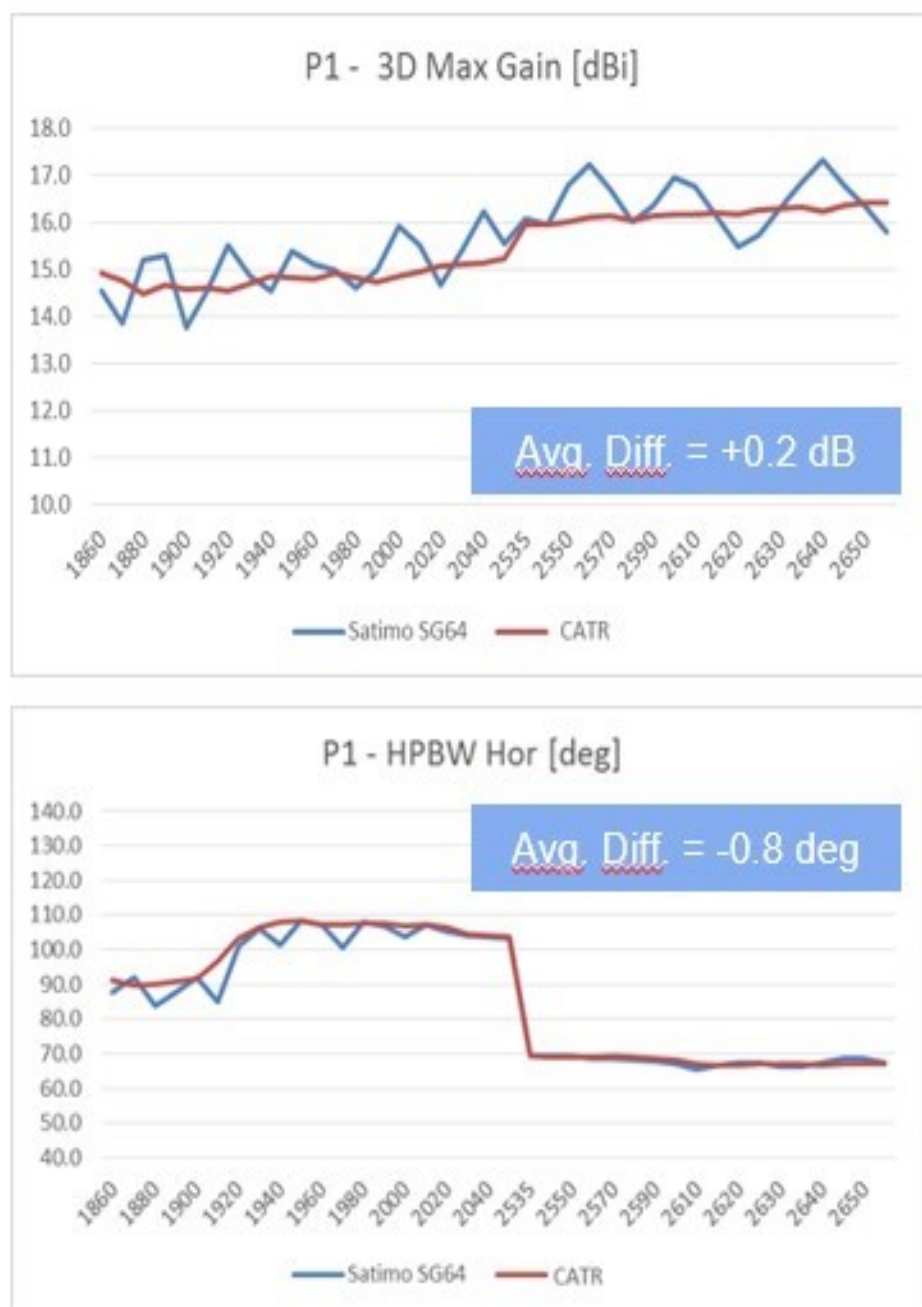
Kuvasta 16 nähdään, että vertikaalileikkauksella CATR (sininen) ja SG64 (oranssi) korreloivat hyvin keskenään. $R^2 \geq 0.87$.



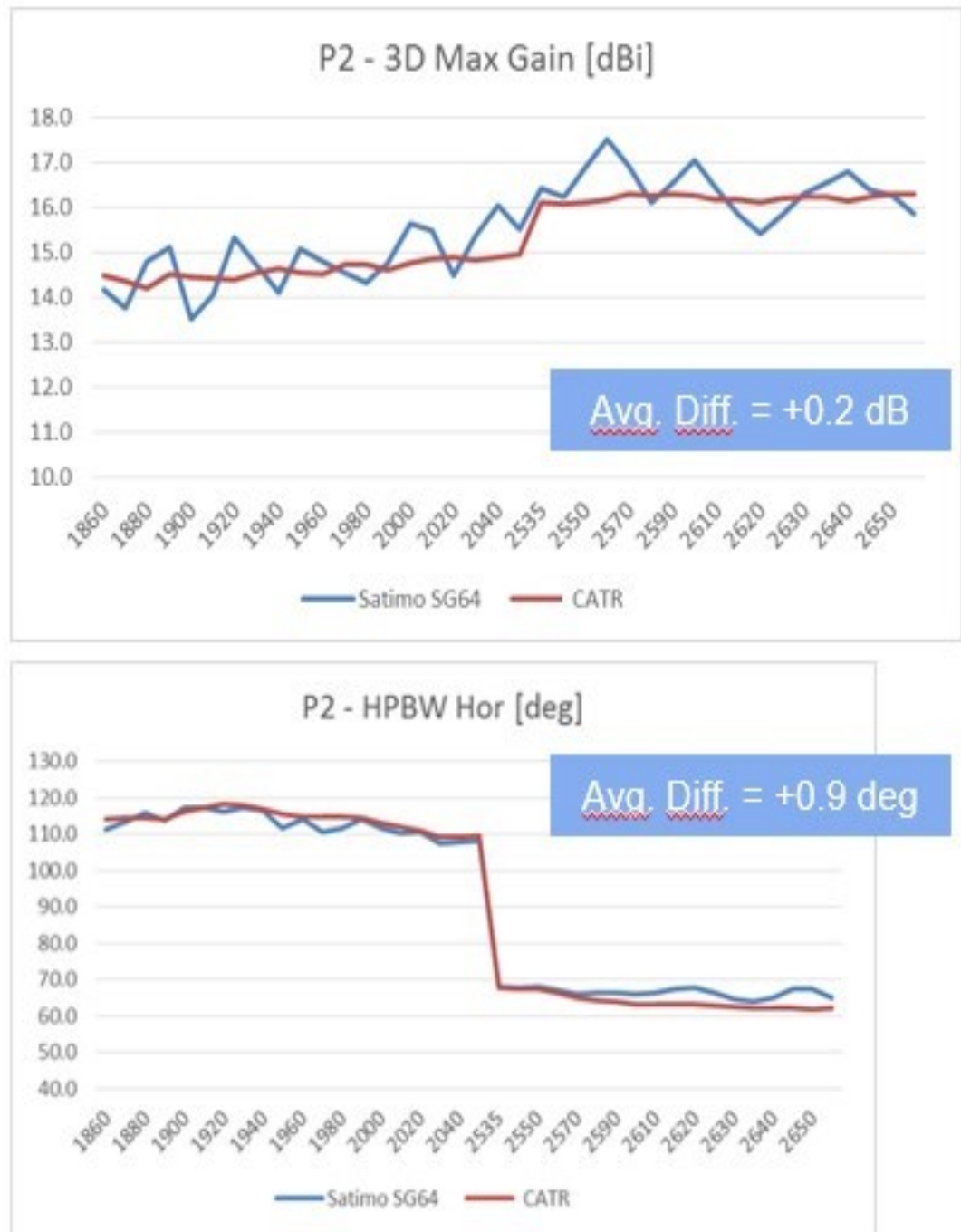
Kuva 16. CATR (sininen) ja SG64 (oranssi) säteilykuvion vertailu vertikaalileikkauksella.

Maksimaalisen vahvistuksen (3D Max Gain) ja sekä puolen tehon kaistanleveys (HPBW) mittausten vertailu taajuuden funktiona esitetty kuvissa 17 ja 18. SG64:llä (sininen) on selvästi enemmän aaltoisuutta kuin CATR:lla (oranssi) maksimaalisessa

vahvistuksessa ja keskimääräinen ero on +0.2dB. Horisontaalileikkauksen puolen tehon kaistanleveyden mittauksissa on havaittavissa sama ilmiö kuin maksimaalisen vahvistuksen mittauksissa. Enemmän aaltoisuutta SG64:llä ja keskimääräinen ero p1:llä -0.8 astetta ja p2:lla +0.9 astetta.

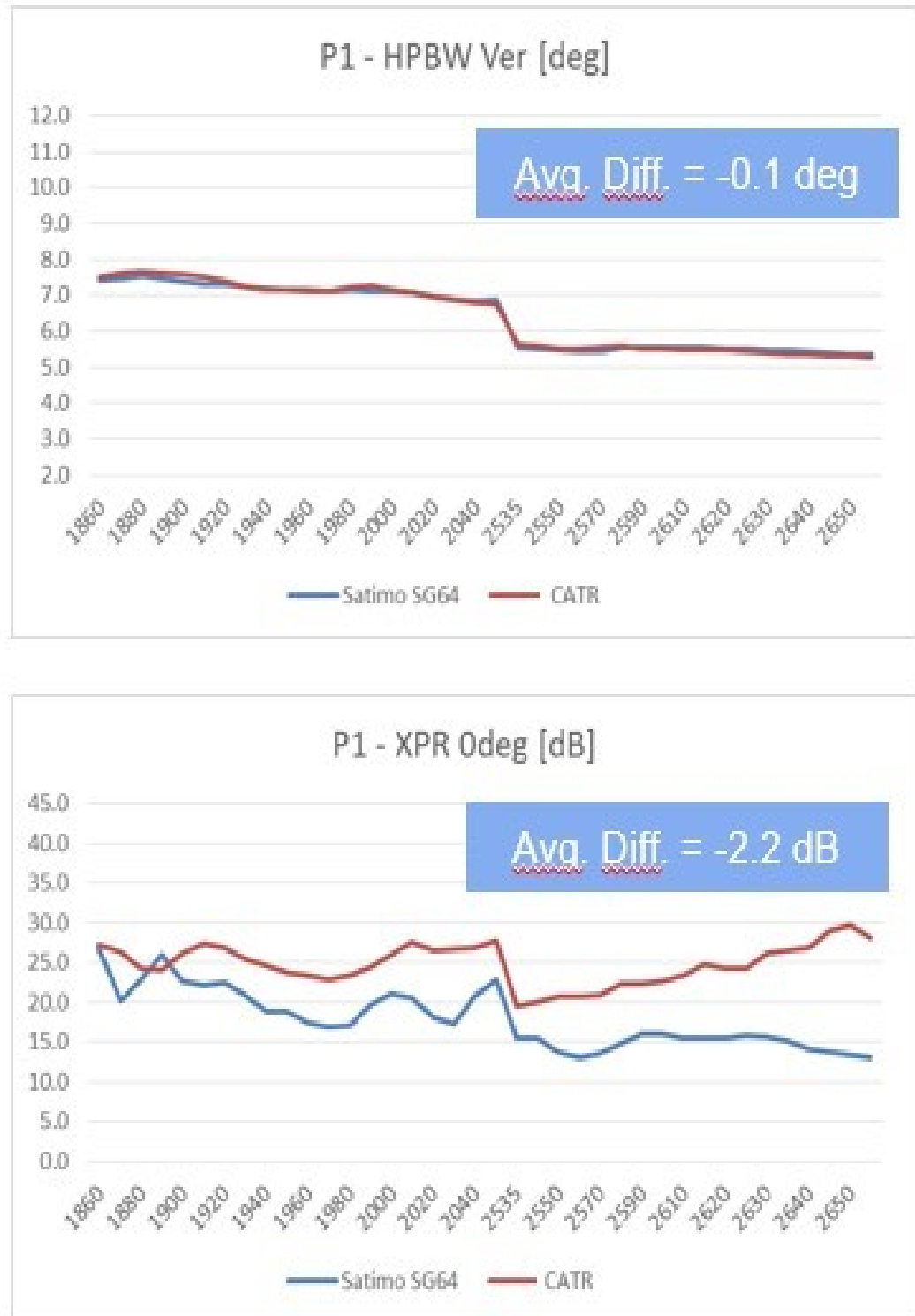


Kuva 17. Maksimaalisen vahvistuksen (3D Max Gain) ja puolen tehon kaistanleveyden (HPBW) (Horisontaali) vertailu p1:lle. CATR (oranssi) ja SG64 (sininen).

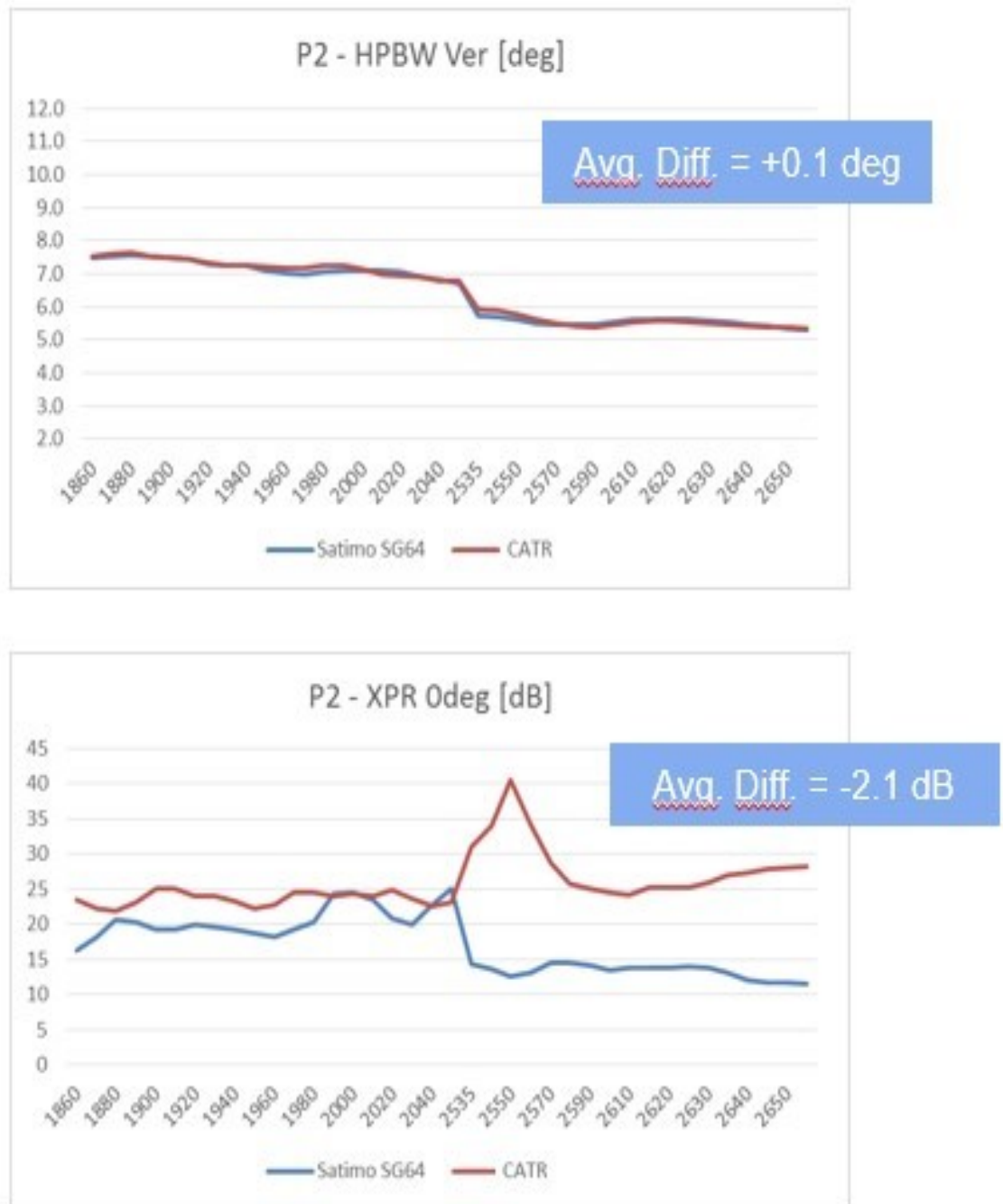


Kuva 18. Maksimaalisen vahvistuksen (3D Max Gain) ja puolen tehon kaistanleveyden (HPBW) (Horisontaali) vertailu p2:lle. CATR (oranssi) ja SG64 (sininen).

Kuvissa 19 ja 20 esitetty HPBW mittausten vertailu (CATR – oranssi, SG64 sininen) vertikaalileikkauksella sekä maksimaalisten vahvistuksien vertailu. Kuvaajista nähdään, että vertikaalileikkauksella (ylempi) kuvaajat korreloivat hyvin keskenään. Maksimaalisen vahvistuksen ristipolarisaatiomittauksissa havaittavissa, että SG64 suoriutuu hieman heikommin. Keskimääräinen vahvistuksen ero p1:llä 2.2dB ja p2:llä -2.1 dB.



Kuva 19. HPBW vertailu vertikaalileikkauksella pääpolarisaatiolla (ylempi) sekä ristipolarisaatiosuhteella (XPR – alempi) p1:lle.



Kuva 20. HPBW vertailu vertikaalileikkauksella pääpolarisaatiolla (ylempi) sekä ristipolarisaatiosuhteella (XPR – alempi) p2:lle.

Taulukossa 4 listattu selityssasteet ja keskimääräiset eroavaisuudet edellä tehdyistä mittauksista. Vertikaalikaistanleveys keskustasta, horisontaalikaistanleveys keskustasta sekä ristipolarisaatio suhteesta tehtyt mittaukset CATR:lla ja Satimo SG64:llä korreloivat heikosti keskenään. Tämä voi johtua siitä, että parametrien jälkikäsitellyssä on hieman eroavaisuuksia näiden mittaustekniikoiden välillä. Näitä lukuun ottamatta datan korrelointi ja keskimääräisten erojen vahvistuksen ja kaistanleveyden arvot ovat erittäin hyviä. Taulukossa 4 KA tarkoittaa keskiarvoa.

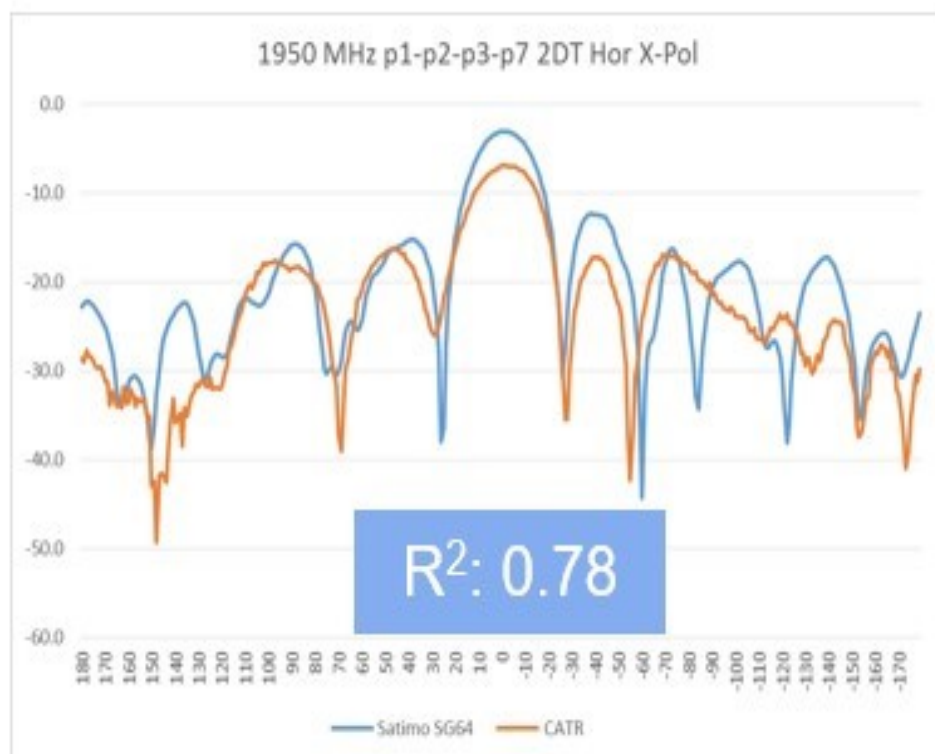
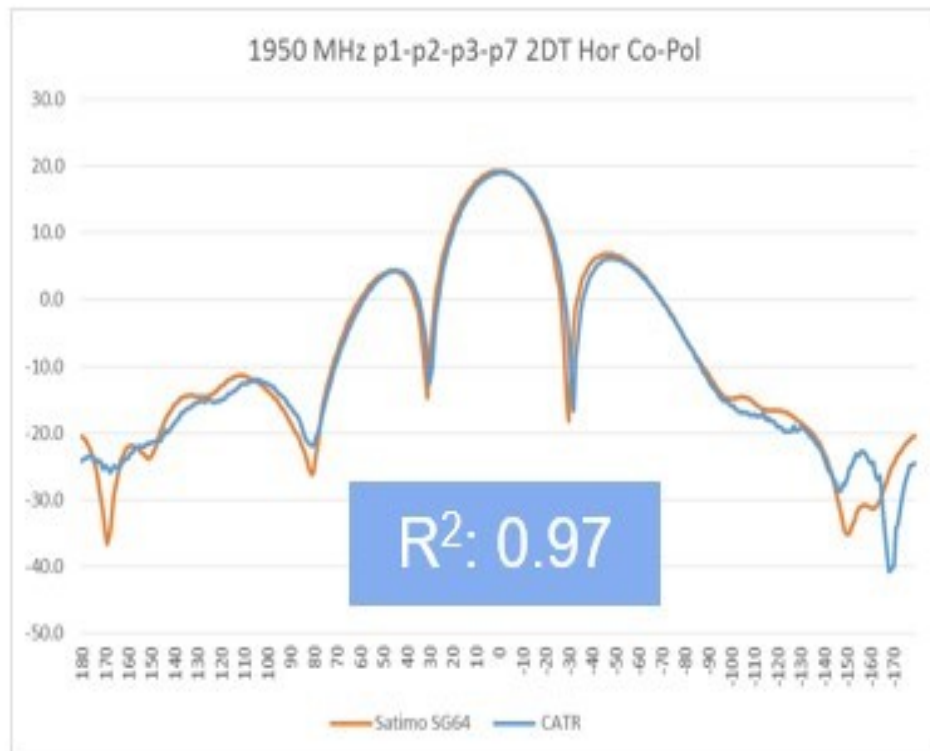
Taulukko 4: Yksittäisten porttien statistiset analyysit.

Kaikki antenniportit 7DT						
Parametri	Vahvistus (dB)	Vertikaalikaistanleveys [3dB] (°)	Vertikaalikaistanleveys keskusta [3dB] (°)	Horisontaalikaistanleveys [3dB] (°)	Horisontaalikaistanleveys keskusta [3dB] (°)	Ristipolarisaatio suhde (dB)
KA: R^2	0.87	1.00	0.10	0.99	0.36	0.28
KA: Ero	0.16	0.03	0.48	-0.55	-2.40	-2.01

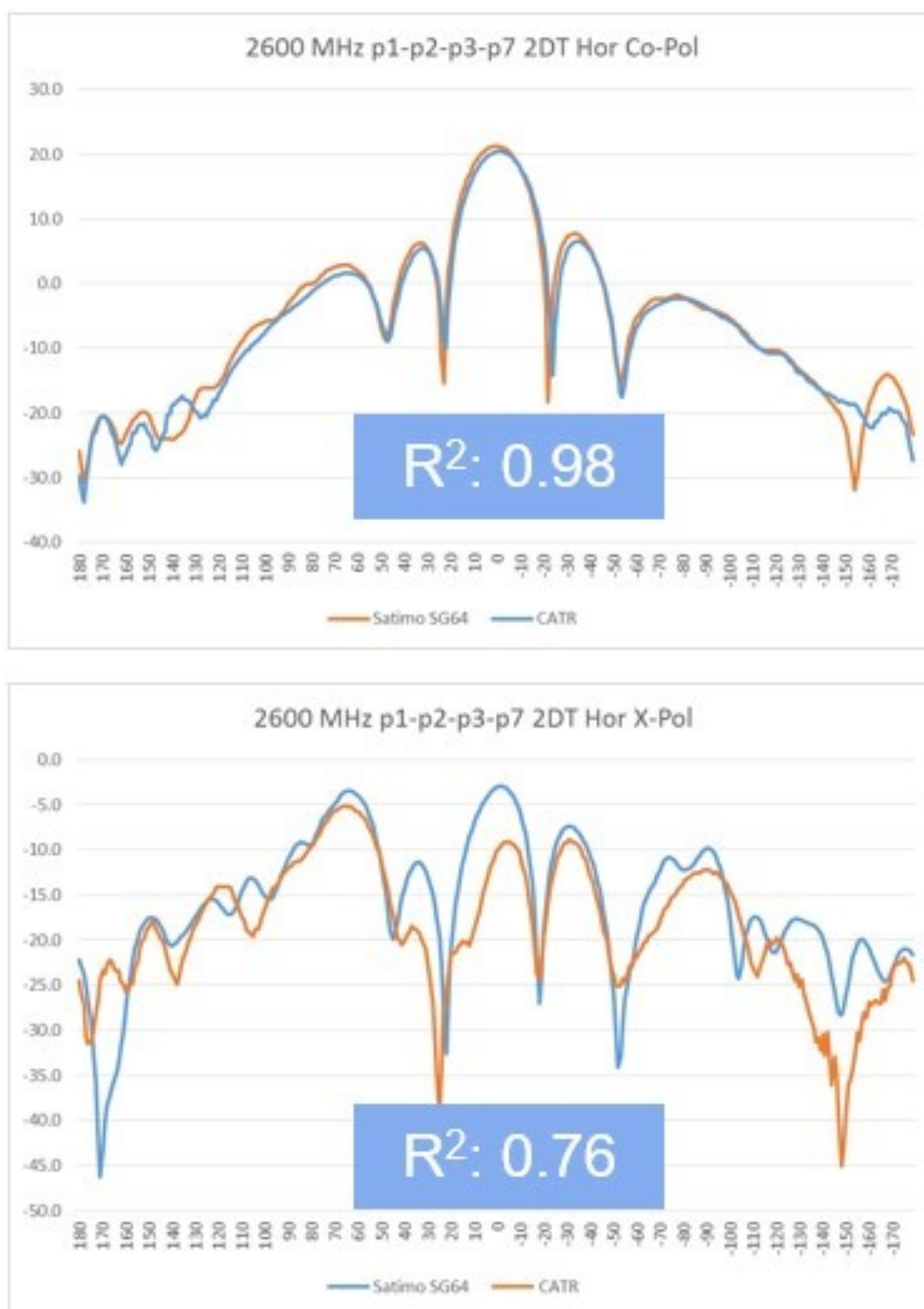
5.2 Yhdistettyjen antenniporttien mittaukset

Yhdistettyjen antenniporttien mittaaminen suoritettiin 1:4 tehojakajan avulla. Näissä testeissä otettiin huomioon antenniportit p1, p2, p3 ja p7. Mittaukset suoritettiin antennin pääkeilankallistusarvoilla 2 DT ja 7 DT.

Kuvista 21, 22 ja 23 nähdään, että CATR:n ja SG64:n säteilykuviot muistuttavat hyvin paljon toisiaan. Kuvien 21 ja 22 horisontaalileikkauksen pääpolarisaation selitysaste on 0.97, mutta ristipolarisaatiolla on havaittavissa hieman enemmän eroavaisuuksia. Ristipolarisaatioiden selitysaste on matalimmillaan 0.76, mikä on kuitenkin suhteellisen hyvä tulos.

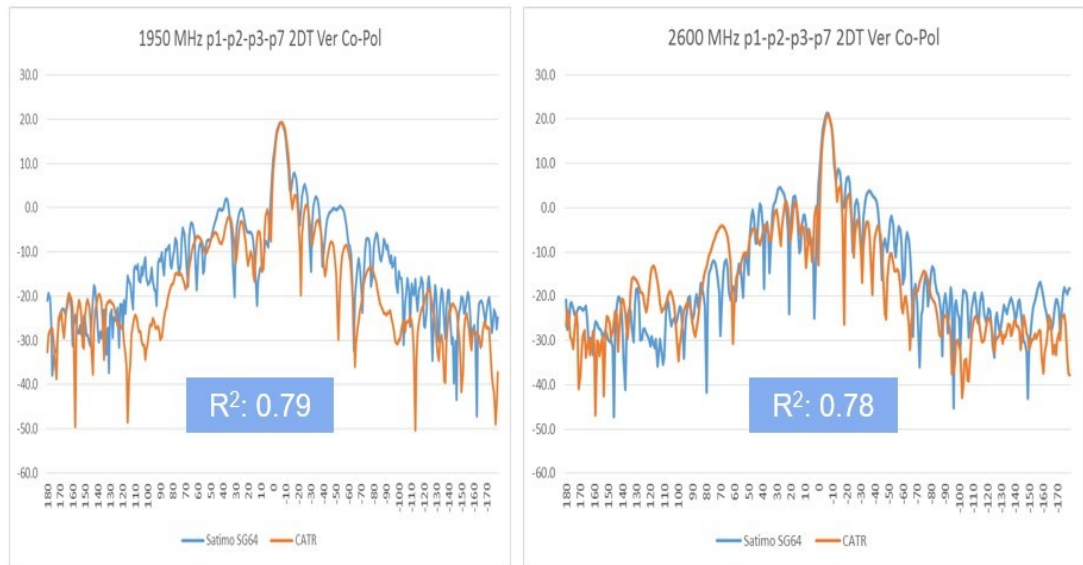


Kuva 21. Säteilykuvioiden korrelointi horisontaalileikkauksella pääpolarisaatiolla sekä ristipolarisaatiolla taajuudella 1950MHz, jossa pääkeilankallistus 2DT.



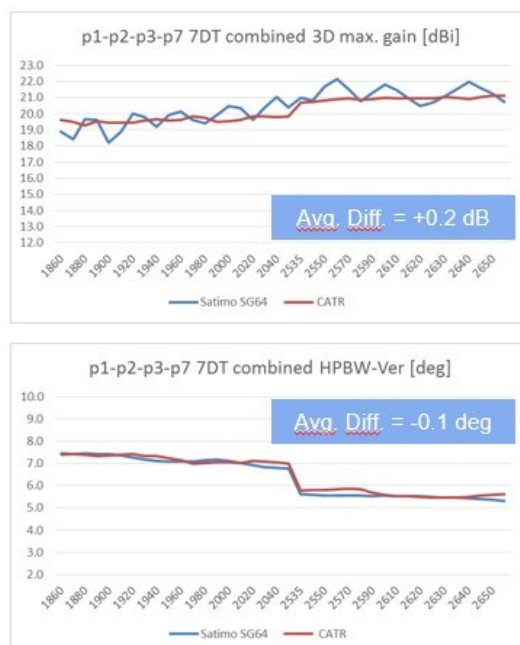
Kuva 22. Säteilykuvioiden korrelointi horisontaalileikkauksella pääpolarisaatiolla sekä ristipolarisaatiolla taajuudella 2600MHz, jossa pääkeilankallistus 2DT.

Kuvassa 23 on piirretty CATR:n ja SG64:n vertikaalileikkauksen säteilykuvio pääpolarisaatiolla. Selitysaste on 0.78 eli hyvällä tasolla. SG64-järjestelmän mittausten sivukeilat kuuluvat kuitenkin hieman paremmin, kuin CATR-järjestelmän.



Kuva 23. Säteilykuvioiden korrelointi vertikaalileikkauksella pääpolarisaatiolla taajuuksilla 1950MHz ja 2600MHz, jossa pääkeilankallistus 2DT.

Kuvista 24 ja 25 verrataan CATR:n ja SG64:n suorituskkyä maksimaalisen vahvistuksen ja HPBW:n suhteen. Kuten kuvan 14 analysoinneissa on todettu, myös näissä mittauksissa on nähtävissä enemmän aaltoilua SG64 järjestelmän maksimaalisen tehon mittauksissa. Käyrät korreloivat sekä vertikaali- että horisontaalileikkauksissa kuitenkin hyvin, mutta ristipolarisaation mittauksissa on nähtävissä selvä 3dB:n ero SG64:n eduksi.



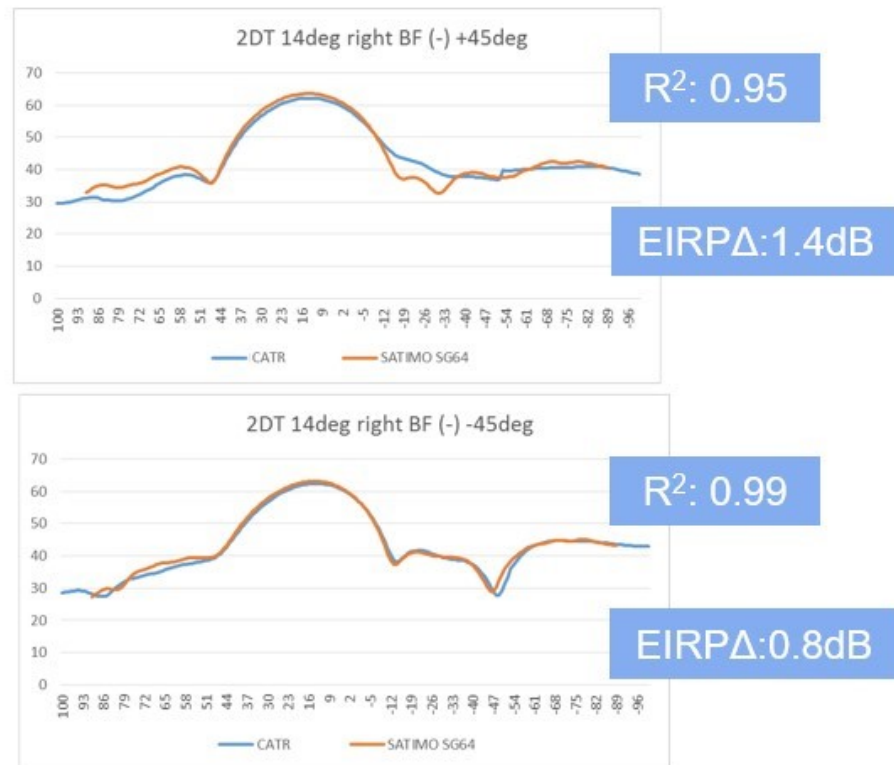
Kuva 24. Maksimaalisen vahvistuksen mittaus pääpolarisaatiolla sekä HPBW mittausten vertailu vertikaalileikkauksella, jossa pääkeilankallistus 7DT.



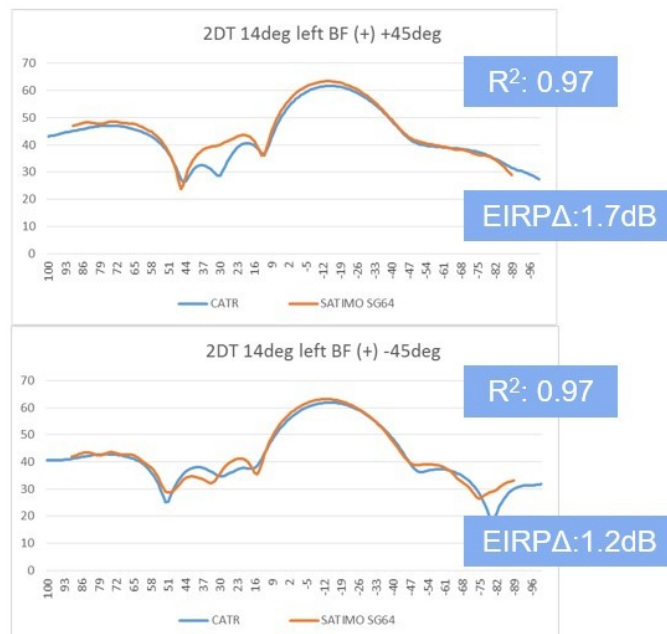
Kuva 25. Maksimaalisen vahvistuksen mittaus ristipolarisaatiolla sekä HPBW mittauksen vertailu horisontaalileikkauksella, jossa pääkeilankallistus 7DT.

Kuvissa 26 ja 27 on tutkittu CATR:n ja SG64:n säteilykuvioiden korrelointia sekä EIRP-mittausten eroja molemmilla polarisaatioilla, +45 (p1, p2, p3, p7) ja -45 (p4, p5, p6, p8) kun pääkeilaa on käännetty a) 14 astetta oikealle, kuva 26 b) 14 astetta vasemmalle, kuva 27, kun pääkeilankallistuskulma on 2DT.

Kun keilaa käännetään, antennielementtien vaiheita säätämällä, joko 14 astetta oikealle, kuva 26, tai 14 astetta vasemmalle, kuva 27, voidaan nähdä, että molempien järjestelmien säteilykuviot korreloivat todella hyvin. Selitysaste onkin heikoimmillaan tapauksessa, jossa keilaa on käännetty oikealle 14 astetta ja mittauksen kohteena on +45 polarisaatio eli portit p1, p2, p3 ja p7. Tällöinkin selitysaste on kuitenkin 0.95. Molemmissa tapauksissa on havaittavissa, että SG64 järjestelmän mittauks tulokset antavat hieman paremmat EIRP arvot.



Kuva 26. Keila käännetty -14 astetta (oikealle) 2DT:n kallistuksella.



Kuva 27. Keila käännetty +14 astetta (vasemmalle) 2DT:n kallistuksella.

Kuvassa 28 on tutkittu mittausjärjestelmien selitystasetta, kun keila on kohdistettu suoraan DUT:iin eli antennin keskiakselille. Selitystaso on yhtäläinen molemmille polarisaatioille ja hyvällä tasolla $R^2=0.86$. Kuitenkin SG64:n järjestelmän kokonaisteho sekä sivukeilojen tehot havaitaan hieman korkeampana



Kuva 28. Keila kohdistettu 0 asteeseen (keskelle) 2DT:n kallistuksella.

Lopuksi suoritettiin toistokoe SG64 järjestelmälle porttien p1, p2, p3 ja p7 kombinaatiolle, kun keilaa käännetään 14 astetta vasemmalle. Toistokoe suoritettiin kuusi kertaa, joista kaksi ensimmäistä tulivat ensimmäisenä päivänä ja loput neljä toisena päivänä. Toistokoe osoitti, että SG64 järjestelmä on stabiili ja tulokset ovat toistettavissa. Vain yksi poikkeus tehotasoissa löydettiin kuvion nollatasossa näiden testien aikana. Keskihajonta (Stdev) oli 0.41dB, kuten kuvassa 29 esitetään.



Kuva 29. Kuuden toiston toistokoe, jossa keila käännetty +14 astetta (vasemmalle) 2DT:n kallistuksella. (p1, p2, p3, p7)

5.3 Tulosten analysointi ja yhteenveto

Yksittäisten antenniporttien mittauksissa ei huomattu suuria eroja selityksasteissa, kun vertailtiin pääpolarisaatioiden säteilykuvioiden korreloivuutta vertikaali- ja horisontaalileikkauksella parametrien. Maksimaalisen vahvistuksen mittauksissa on havaittavissa enemmän aaltoisuutta Satimo SG64 järjestelmällä.

Yhdistettyjen antenniporttien mittauksissa selityksasteet pysyivät hyvällä tasolla. Hieman suurempia kokonaistehoeroja kuitenkin havaittavissa, kuin yksittäisten antenniporttien mittauksissa. Tämä on nähtävissä esimerkiksi, kun tutkitaan kuvia 15 ja 19, joissa sivukeilojen tehotasot ovat selvästi korkeammalla SG64:n tuloksissa. Myöskin keilakääntökokeissa selityksaste pysyi hyvänä, mutta myös näissä tuloksissa on havaittavissa SG64:n EIRP mittauksissa hieman parempaa suorituskykyä. Toisaalta SG64:n parempi suorituskyky voi myöskin olla kalibroinnista johtuvaa eroavaisuutta. Toistokoe osoitti, että SG64 systeemi on stabiili eikä tulokset heittele juurikaan eri mittausten välillä.

Kokonaisuudessaan mittauksissa ei havaittu suuri eroja. CATR:n ja Satimo SG64:n mittaustulokset korreloivat hyvin keskenään, mutta hieman suurempaa heittelyä kuitenkin havaittavissa kun mitataan yhdistettyjä antenniportteja. Huomattavaa on kuitenkin mittausten suorituksien ajallinen ero. SG64 systeemin kykeni suorittamaan mittaukset huomattavasti nopeammin, kuin CATR mittaukset. Esimerkiksi koko 3D mittausten käsittely kestää SG64 systeemillä noin 12 minuuttia, kun taas CATR järjestelmällä tämä kestää tunteja.

5. YHTEENVETO

Työn mittaukset osoittivat, että Satimo SG64:llä tehdyt NF mittaukset voidaan luotettavasti muuntaa FFT:llä FF säteilykuvioksi, koska Satimo SG64:n mittaukset korreloi hyvin CATR-kammiossa tehtyjen FF mittausten kanssa. Satimo SG64:n mittaustuloksissa oli myös aavistuksen suuremmat tehotasot, niin sivukeilojen ja pääkeilojen mittauksissa, kuin EIRP mittauksissa, vaikkakin maksimaalisen vahvistuksen mittauksissa huomattiin selkeää aaltoisuutta CATR:n mittauksiin verrattuna. Oleellista oli myös havainto Satimo SG64:n mittausten suoritusnopeudesta. Täysin ei pystytty todistamaan ristipolarisaatioiden korreloivuutta, mutta viitaten muihin mittauksiin sekä siihen, että parametrien jälkikäsitelyissä oli eroavaisuuksia, voidaan olettaa niidenkin korreloivan suhteellisen hyvällä tasolla. Satimo SG64 järjestelmä on hyvä vaihtoehto 5G:n ilmarajapinnan ylitse tehtäviin mittauksiin.

Kandidaatintyön aihe oli mielenkiintoinen sekä herätti suuren motivaation oppia lisää aiheesta. Työn avulla opin uusia näkökulmia ilmarajapinnan yli tehtäviin mittauksiin sekä opin hyvin paljon uusia mittaustekniikoita. Myöskin säteilykuvioden mittaustulosten analysointiin opin uutta tärkeää informaatiota, kuten säteilykuvioden korreloivuuden sekä EIRP-arvojen vertailusta saatavaa informaatiota laitteesta, joka oli ennen kandidaatintyön aloittamista hieman tuntematon minulle.

6. LÄHTEET

- [1] Andrea Goldsmith, Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005, Chaps. 1–3, 5–8 (+ 12, 13, 15)
- [2] Stewart J. (2014) 5G will require new as well as established spectrum bands, but the availability of new bands is not confirmed, Analysis Mason, Article, (accessed 16.6.2017) <http://www.analysismason.com/About-Us/News/Newsletter/5Gspectrum-Oct2014/>
- [3] Usman Habib, Anthony E. Aighobahi , Terence Quinlan , Stuart D. Walker, and Nathan J. Gomes , JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 36, NO. 19, OCTOBER 1, 2018
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8352847&tp=&ALU=L U1050277>
- [4] Electronic-notes, 27.11.2019,
<https://www.electronicnotes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/mmwavemillimetre-wave.php>
- [5] Bevelacqua, Pete. "Friis Equation - (aka Friis Transmission Formula)".
www.antenna-theory.com
- [6] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology, Academic Press, 9.8.2018
- [7] 3GPP Specification – FR1 (sub 6 GHz), <https://www.3gpp.org/>
- [8] 3GPP Specification – FR2 (mmWave), <https://www.3gpp.org/>
- [9] Mathuranathan Viswanathan, August 6, 2014,
<https://www.gaussianwaves.com/2014/08/mimo-diversity-and-spatialmultiplexing/>
- [10] Osseiran A., Monserrat J. F. & Marsch P. (2016) 5G Mobile and Wireless Communications Technology. Cambridge University Press. 137-155 pp.
- [11] Asim Mazin, Mohamed Elkourdi, and Richard D. Gitlin, Accelerating Beam Sweeping in mmWave Standalone 5G New Radios using Recurrent Neural Networks, 4.9.2018, <https://arxiv.org/pdf/1809.01096.pdf>
- [12] Arto Kinos, Over the Air Beamforming Measurement Techniques with a Case Study on Crest Factor Reduction's Effect on Error Vector Magnitude. Diplomityö. Oulun yliopisto, sähkö- ja tietotekniikan osasto, Oulu. [13] Tutorialspoint, antenna theory, 20.11.2019, URL:
https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_beam_width.htm
- [14] Near-field vs. Far-field (accessed 2.2.2017) URL:
http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/NSI-near-far.pdf
- [15] Juha Ala-Laurinaho, Aalto yliopisto, Antenna measurements at THz, 4.5.2016
- [16] Constantine A. Balanis, ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN 3rd
- [17] IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements, 5.12.2012, <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6375745>
- [18] Jukka Kempainen, Oulun Yliopisto, Tilastomatematiikka, URL http://s-matpcs.oulu.fi/~jukemppa/Tilasto17_luentokalvot_viikko6_printable.pdf

